



Sérgio Manuel Ferrão de Azevedo Capela e Silva

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Modelação Numérica da Interacção Onda-Estrutura em Emissários Submarinos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientadora: Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves,
Doutora, FCT-UNL/LNEC

Co-orientador: Eric Lionel Didier, Doutor, FCT-UNL/LNEC

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Nuno Manuel da Costa Guerra

Arguente: Prof. Doutor José Manuel Paixão Conde

Vogais: Prof. Doutora Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves
Prof. Doutor Eric Lionel Didier



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Julho de 2012

COPYRIGHT ©2012 Sérgio Manuel Ferrão de Azevedo Capela e Silva, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

“We choose to go to the moon ...and do the other things, not because they are easy, but because they are hard” - JFK

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à Professora Maria da Graça Neves por ter orientado a presente dissertação, por me ter dado confiança e esperança nos piores momentos da sua elaboração, mas também pela sua sempre simpatia, disponibilidade e crítica construtiva. Um agradecimento também ao Professor Eric Didier por tudo o que me ensinou, sem isso esta dissertação não teria sido realizada. Ainda um agradecimento ao Eng.º Jorge Gadelho por toda a sua preciosa ajuda e ensinamentos de MATLAB.

Por fim, agradeço aos meus amigos mais chegados e à minha família toda a paciência e apoio que me deram durante a realização desta dissertação, sem eles não teria chegado onde cheguei.

RESUMO

Na presente dissertação investiga-se a interacção onda-estrutura num emissário submarino em regimes de escoamento na transição de laminar para turbulento e subcrítico com recurso ao modelo numérico IH-2VOF, modelo que resolve as equações RANS. Variando as configurações de corrente e agitação, foram analisados vários cenários que permitissem obter várias frequências de desprendimento de vórtices e números de Strouhal.

As simulações em regime permanente foram efectuadas para números de Reynolds de 200 e 1000, as em regime oscilatório para alturas de onda de 0,01m e períodos de 20s, 60s, 90s e 130s e a simulação combinada de regime permanente e oscilatório para Reynolds de 1000 e onda com altura de 0,01m e período de 130s.

Sendo que este emissário submarino é um cilindro liso e regular, é de esperar, para casos de escoamento estacionário, a formação de vórtices a jusante, vórtices estes que se formam para números de Reynolds superiores a 40. Visto na presente dissertação se estudarem condições de escoamento com números de Reynolds superiores a 200, os vórtices formam-se a jusante do cilindro, criando uma típica esteira de Von Kármán. Nos casos de escoamento oscilatório, são de esperar desprendimentos ora a barlar ora a sotamar, consoante a oscilação do escoamento provocada pela onda.

Analisando os resultados, verifica-se que o modelo numérico não possui precisão suficiente para velocidades muito reduzidas como as verificadas para $Re=200$ (necessidade de análise do sinal do coeficiente de sustentação através de um filtro de sinais, devido ao elevado ruído do mesmo) e que em todos os outros casos tende-se a obter valores relativamente próximos dos encontrados na literatura.

Na presente dissertação não se obteve, contudo, valores convergentes com os esperados uma vez que para tal seria necessária uma discretização muito refinada do domínio de cálculo, particularmente nas proximidades do cilindro, discretização esta que exigiria um grande esforço computacional.

Palavras-chave: Emissário submarino, onda, corrente, vórtice, modelo numérico, IH-2VOF

ABSTRACT

In this present thesis the wave-structure interaction is studied on an outfall on flow regimes in the transition from laminar to turbulence and subcritical using the numerical model IH-2VOF, model which resolves the RANS equations. Ranging configurations of flow, sea waves and the combination of flow and sea waves, various scenarios were analyzed in order to obtain several vortex shedding frequencies and Strouhal numbers.

The simulations on steady current were made to Reynolds numbers 200 and 1000, on oscillatory regime for wave's height of 0,01m and periods of 20s, 60s, 90s and 130s and the combined simulation of steady current and oscillatory flow for Reynolds number of 1000, wave height of 0,01m and wave period of 130s.

Being this marine outfall a smooth and circular cylinder, it is to expect, for stationary flow cases, a vortex street downstream the cylinder, vortices that are formed for Reynolds numbers larger than 40. As in the present thesis are studied flow regimes with Reynolds numbers larger than 200, vortices are formed downstream the cylinder, creating a typical Von Kármán vortex street. In oscillatory flow cases, it is to expect vortex detachments sometimes landward sometimes seaward, according to the flow oscillation caused by the wave.

Analyzing the results, it is verified that the numerical model does not possess enough precision for such small velocities as those that are verified for $Re=200$ (necessary analysis of the lift coefficient signal through a signal filter due to the high noise of the same) and that in all other cases tends to get values near those found in the literature.

In this present thesis it was not obtain, however, convergent values as expected since therefore it would be necessary a very refined calculus domain discretization, especially near the cylinder, which would lead to a large computational effort.

Keywords: Marine outfall, wave, flow, vortex, numerical model, IH-2VOF

Índice

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	ESCOAMENTO EM TORNO DE CILINDROS	5
2.1	Escoamentos	5
2.1.1	Escoamentos estacionários com corrente uniforme.....	5
2.1.2	Escoamentos oscilatórios.....	8
2.2	Agitação marítima	10
2.2.1	Tipos de ondas e suas características.....	10
2.2.2	Teorias de onda	14
2.3	Interação onda-estrutura	15
2.3.1	Grandezas envolvidas.....	15
2.3.2	Variação de grandezas devido a variações do escoamento e da agitação.....	16
3.	MODELO NUMÉRICO IH-2VOF	18
3.1	Introdução.....	18
3.2	Equações que regem o modelo	18
3.3	Conceitos base.....	20
3.4	Domínio computacional e definição da malha	22
3.5	Dados de entrada e saída do modelo	23
4.	APLICAÇÃO DO MODELO IH-2VOF	26
4.1	Enquadramento do estudo	26
4.2	Metodologia.....	26
4.3	Corrente.....	27
4.4	Agitação	27
4.5	Geometria e domínio computacional.....	28
4.6	Sondas numéricas	31
4.7	Casos simulados	33
5.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	35
5.1	Regime estacionário	35
5.1.1	Análise de sensibilidade dos resultados com a resolução das malhas	35
5.1.2	Comparação com os resultados do modelo FLUENT	38
5.2	Regime oscilatório.....	45
5.2.1	Análise de sensibilidade dos resultados com a resolução das malhas	45

5.2.2	Resultados para diferentes períodos	47
5.3	Regime combinado – estacionário e oscilatório	55
5.4	Resultados do modelo	57
6.	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO.....	64
	Bibliografia.....	67
	ANEXOS.....	68
Anexo A	INTERFACE DO <i>SOFTWARE</i> CORAL.....	68
Anexo B	BATEDOR NUMÉRICO	71
Anexo C	CÓDIGO MATLAB.....	73
Anexo C.1	Ficheiro ‘ <i>tese_1.m</i> ’	75
Anexo C.2	Ficheiro ‘ <i>tese_2.m</i> ’	78
Anexo C.3	Ficheiro ‘ <i>tese_3.m</i> ’	83
Anexo C.4	Ficheiro ‘ <i>calc_grandezas.m</i> ’	85
Anexo C.5	Ficheiro ‘ <i>le_v_e_vort.m</i> ’	89
Anexo C.6	Ficheiro ‘ <i>plot_e_quiver.m</i> ’	92
Anexo C.7	Ficheiro ‘ <i>plot_e_streamslice.m</i> ’	95
Anexo C.8	Ficheiro ‘ <i>plot_e_vortex.m</i> ’	97

Índice de Quadros

Quadro 4.1- Dimensões dos domínios de cálculo. Valores em metros.	28
Quadro 4.2 - Subzonas em x das malhas de cálculo computacional. Valores em metros.	28
Quadro 4.3 - Subzonas em y das malhas de cálculo computacional. Valores em metros.	29
Quadro 4.4 - Coordenadas do centro do cilindro.	29
Quadro 4.5 – Coordenadas das posições das sondas numéricas. Valores em metros	32
Quadro 4.6 - Identificação das simulações efectuadas.	34
Quadro 5.1 – Forças horizontais e verticais, coeficientes de arrasto e sustentação e respectivos rms para os casos de malha grosseira e fina; $Re=200$	35
Quadro 5.2 - Frequências, períodos de desprendimento de vórtices e número de Strouhal para os casos de malha grosseira e fina; $Re=200$	36
Quadro 5.3 – Forças horizontais, verticais, coeficientes de arrasto, sustentação e respectivos rms para caso de malha grosseira e fina; $Re=1000$	37
Quadro 5.4 - Frequências, períodos de desprendimento de vórtices e número de Strouhal para caso de malha grosseira e fina; $Re=1000$	37
Quadro 5.5 – Forças horizontais e verticais, coeficientes de arrasto e sustentação e respectivos rms – comparação dos resultados do FLUENT com IH-2VOF; $Re=200$	38
Quadro 5.6 - Valores das frequências, f_v , períodos de desprendimento de vórtices, T_v , e número de Strouhal obtidos com o FLUENT e com o IH-2VOF; $Re=200$	38
Quadro 5.7 – Forças horizontais, verticais, coeficientes de arrasto, sustentação e respectivos rms – comparação dos resultados do FLUENT com IH-2VOF; $Re=1000$	40
Quadro 5.8 - Frequências, períodos de desprendimento de vórtices e número de Strouhal – comparação dos resultados do FLUENT com IH-2VOF; $Re=1000$	40
Quadro 5.9 – Forças horizontais e verticais, coeficientes de arrasto e sustentação e respectivos rms para caso de malha grosseira e fina; $H=0,01m$, $T=130s$	45
Quadro 5.10 - Frequências, períodos de desprendimento de vórtices e número de Strouhal para caso de malha grosseira e fina; $H=0,01m$, $T=130s$	45
Quadro 5.11 – Forças horizontais e verticais, coeficientes de arrasto e sustentação e respectivos rms ; $H=0,01m$, $T=20s$, $T=60s$, $T=90s$ e $T=130s$	47
Quadro 5.12 - Frequências, períodos de desprendimento de vórtices e número de Strouhal; $H=0,01m$, $T=20s$, $T=60s$, $T=90s$ e $T=130s$	47
Quadro 5.13 – Forças horizontais e verticais, coeficientes de arrasto e sustentação e respectivos rms ; $Re=1000$, $H=0,01m$ e $T=130s$ (C5); $Re=1000$ (C3); $H=0,01m$ e $T=130s$ (C9).	55
Quadro 5.14 - Frequências, períodos de desprendimento de vórtices e número de Strouhal; $Re=1000$, $H=0,01m$ e $T=130s$; $Re=1000$; $H=0,01m$ e $T=130s$	55
Quadro 5.15 – Resumo do número de Reynolds, Keulegan-Carpenter, Strouhal e regime de escoamento para os casos de estudo.	57

Índice de figuras

Fig. 1.1 - Perfil longitudinal-tipo de um emissário submarino (Afonso et al., 2007).....	1
Fig. 1.2 - Perfil transversal-tipo de um emissário enterrado na zona de rebentação (Afonso et al., 2007).....	1
Fig. 1.3 - Aplicação dos blocos de afundamento num emissário (ETERMAR - Engenharia e Construção, 2010).	2
Fig. 1.4 - Instalação de emissário submarino, fase anterior ao seu afundamento (ETERMAR - Engenharia e Construção, 2010).	2
Fig. 1.5 - Perfis longitudinal e transversal-tipo de um troço de emissário estabilizado com recurso a blocos de afundamento (Afonso, C. et al, 2007).	3
Fig. 2.1 – Modos de desprendimento de vórtices para $40 < Re < 200$, $200 < Re < 300$ e regime subcrítico, $300 < Re < 3 \times 10^5$; Adaptado de Sumer & Fredsøe, 2006.	6
Fig. 2.2- Definição de esteira e camada limite; Adaptado de Sumer & Fredsøe, 2006.....	6
Fig. 2.3 – Detalhe das características do escoamento nas proximidades de um cilindro; Adaptado de Sumer & Fredsøe, 2006.....	7
Fig. 2.4 - Mecanismo de formação de vórtices (Sumer & Fredsøe, 2006).....	7
Fig. 2.5 - Vorticidade tipo Honji; Adaptado de Sumer & Fredsøe, 2006.....	9
Fig. 2.6 - Desprendimento de vórtices para $24 < KC < 32$; Adaptado de Sumer & Fredsøe, 2006.	10
Fig. 2.7 - Parâmetros geométricos de uma onda	11
Fig. 2.8 - Ábaco do âmbito de aplicação das diversas teorias de onda (US Army Corps of Engineers, 2006).....	14
Fig. 2.9 - Número de Strouhal em função de Re para um cilindro liso e circular; Adaptado de Sumer & Fredsøe, 2006.	17
Fig. 3.1 – Campo de velocidades horizontais instantâneas para uma corrente estacionária de 0,5 m/s.21	
Fig. 3.2 - Fluxograma sequencial da aplicação do modelo IH-2VOF (adaptado de Lara et al., 2006). 21	
Fig. 3.3 - Esquema de subzonas em x e em y de um dado domínio computacional.	22
Fig. 3.4 - Esquema da definição das diversas grandezas calculadas por célula.	23
Fig. 3.5 - Representação de resultados de velocidade horizontal no domínio obtidos pelo modelo IH-2VOF para $Re=1000$	25
Fig. 4.1 - Esquema de verificação das forças horizontais.	30
Fig. 4.2 - Esquema de verificação das forças verticais.....	30
Fig. 4.3 - Características da malha computacional grosseira.	32
Fig. 4.4 - Características da malha computacional fina.....	33
Fig. 5.1 - Velocidades horizontais registadas pela sonda nº6 à cota $y=0,35470\text{m}$, para o período compreendido entre 0 e 1500 segundos; $Re=200$	36
Fig. 5.2 - Velocidades horizontais registadas pela sonda 6 à profundidade $y=0,35470\text{m}$, para o tempo entre 0 e 500 segundos; $Re=1000$	37
Fig. 5.3 - Forças horizontais, verticais e respectivos rms – comparação dos resultados do FLUENT com IH-2VOF; $Re=200$	39
Fig. 5.4 - Coeficientes de arrasto, sustentação e respectivos rms – comparação dos resultados do FLUENT com IH-2VOF; $Re=200$	39
Fig. 5.5 - Forças horizontais, verticais e seus rms – comparação dos resultados do FLUENT com IH-2VOF; $Re=1000$	41
Fig. 5.6 - Coeficientes de arrasto, sustentação e seus rms – comparação dos resultados do FLUENT com IH-2VOF; $Re=1000$	41
Fig. 5.7 - Variação das forças horizontais com Re ; IH-2VOF e FLUENT.	42

Fig. 5.8 - Variação das forças verticais com Re ; IH-2VOF e FLUENT.....	42
Fig. 5.9 - Variação do coeficiente de arrasto com Re ; IH-2VOF e FLUENT.	43
Fig. 5.10 - Variação do coeficiente de sustentação com Re ; IH-2VOF e FLUENT.....	43
Fig. 5.11 - Variação do período de desprendimento com Re ; IH-2VOF e FLUENT.....	44
Fig. 5.12 - Variação do número de Strouhal com Re ; IH-2VOF e FLUENT.....	44
Fig. 5.13 - Forças horizontais, verticais e respectivos rms para caso de malha grosseira e fina; $T=130s$, $H=0,01m$	45
Fig. 5.14 - Coeficientes de arrasto, sustentação e respectivos rms para caso de malha grosseira e fina; $T=130s$, $H=0,01m$	46
Fig. 5.15 - Forças horizontais, verticais e respectivos rms ; T variável, $H=0,01m$	47
Fig. 5.16 - Coeficientes de arrasto, sustentação e respectivos rms ; T variável, $H=0,01m$	48
Fig. 5.17 - Frequências de desprendimento e número de Strouhal; $H=0,01m$	48
Fig. 5.18 - Espectro de potências do sinal do coeficiente de sustentação, $H=0,01m$ e $T=20s$	49
Fig. 5.19 - Espectro de potências do sinal do coeficiente de sustentação, $H=0,01m$ e $T=60s$	50
Fig. 5.20 - Zoom do espectro de potências do sinal do coeficiente de sustentação, $H=0,01m$ e $T=60s$	50
Fig. 5.21 - Espectro de potências do sinal do coeficiente de sustentação, $H=0,01m$ e $T=90s$	51
Fig. 5.22 - Espectro de potências do sinal do coeficiente de sustentação, $H=0,01m$ e $T=130s$	51
Fig. 5.23 - Variação da força horizontal com KC ; $H=0,01m$	52
Fig. 5.24 - Variação da força vertical com KC ; $H=0,01m$	52
Fig. 5.25 - Variação do coeficiente de arrasto com KC ; $H=0,01m$	53
Fig. 5.26 - Variação do coeficiente de sustentação com KC ; $H=0,01m$	53
Fig. 5.27 - Variação do período de desprendimento com KC ; $H=0,01m$	54
Fig. 5.28 - Variação do número de Strouhal com KC ; $H=0,01m$	54
Fig. 5.29 - Forças horizontais, verticais e respectivos rms ; $T=130s$, $H=0,01m$ e $u=0,01m/s$; $u=0,01m/s$; $T=130s$ e $H=0,01m/s$	55
Fig. 5.30 - Coeficientes de arrasto, sustentação e respectivos rms ; $T=130s$, $H=0,01m$ e $u=0,01m/s$; $u=0,01m/s$; $T=130s$ e $H=0,01m/s$	56
Fig. 5.31 - Frequências de desprendimento e número de Strouhal; $T=130s$, $H=0,01m$ e $u=0,01m/s$; $u=0,01m/s$; $T=130s$ e $H=0,01m/s$	56
Fig. 5.32 - Velocidade a), linhas de corrente b) e vorticidade c) para o instante $t=150s$; Velocidade d), linhas de corrente e) e vorticidade f) para o instante $t=332s$; $Re=200$	58
Fig. 5.33 - Velocidade a), linhas de corrente b) e vorticidade c) para o instante $t=50s$; Velocidade d), linhas de corrente e) e vorticidade f) para o instante $t=460s$; $Re=1000$	59
Fig. 5.34 - Velocidade a), linhas de corrente b) e vorticidade c) para o instante $t=60s$; Velocidade d), linhas de corrente e) e vorticidade f) para o instante $t=120s$; $Re=1000$ e $KC=24,3$ ($T=130s$).....	60
Fig. 5.35 - Velocidade a), linhas de corrente b) e vorticidade c) para o instante $t=90s$; Velocidade d), linhas de corrente e) e vorticidade f) para o instante $t=100s$; $KC=3,7$ ($T=20s$).....	62
Fig. 5.36 - Velocidade a), linhas de corrente b) e vorticidade c) para o instante $t=150s$; Velocidade d), linhas de corrente e) e vorticidade f) para o instante $t=180s$; $KC=11,2$ ($T=60s$).....	63
Fig. A.1 - Representação do ambiente gráfico do CORAL com subzonas, água e cilindro definidos..	68
Fig. A.2 - Aproximação da visualização do domínio à zona do emissário.	69
Fig. A.3 - Domínio computacional com a malha gerada.	69
Fig. A.4 - Janela de visualização do comando 'Mesh quality'.	70
Fig. B.1 - Janela principal da ferramenta geradora de ondas em MATLAB.....	71
Fig. B.2 - Janela de geração de onda regular.....	71
Fig. B.3 - Janela de definição do batedor.	72

Lista de símbolos

A	Amplitude de onda;
A_C	Amplitude da crista;
A_S	Amplitude da cava;
c	Celeridade da onda;
C_D	Valor médio do coeficiente de arrasto;
C_L	Valor médio do coeficiente de sustentação;
D	Diâmetro;
dx, dy	Dimensão das células em x e y ;
f	Frequência da onda;
F	Força;
F_D	Força de arrasto;
F_I	Força de inércia;
F_L	Força de sustentação;
f_V	Frequência de desprendimento dos vórtices;
F_X	Valor médio da força em x ;
$F_{X\,RMS}$	Valor quadrático médio (root-mean square) de F_X ;
F_Y	Valor médio da força em y ;
$F_{Y\,RMS}$	Valor quadratic médio (root-mean square) de F_Y ;
H	Altura de onda;
h	Profundidade;
k	Energia cinética turbulenta;
k_W	Número de onda;
KC	Número de Keulegan-Carpenter;
L	Comprimento de onda;
L_C	Comprimento do cilindro;
p	Pressão;

p'	Componente de flutuação da pressão;
\bar{p}	Componente média da pressão;
Re	Número de Reynolds;
St	Número de Strouhal;
T	Período de onda;
t	Tempo;
T_V	Período de desprendimento de vórtices;
U	Velocidade horizontal do escoamento não perturbado;
U_i	Velocidade do escoamento segundo a direcção i ;
u'_i	Componente de flutuação da velocidade segundo a direcção i ;
\bar{u}_i	Componente média da velocidade segundo a direcção i ;
U_M	Velocidade máxima do escoamento devido à agitação;
u_x	Velocidade segundo a direcção x ;
u_y	Velocidade segundo a direcção y ;
<i>vortex</i>	Vorticidade;
w	Velocidade segundo a direcção y ;
x, y	Sistema de coordenadas horizontais e verticais;
X_c, Y_c	Coordenadas do centro do cilindro;
δ	Altura relativa de onda;
ε	Taxa de dissipação;
ε_D	Declividade da onda;
η	Elevação da superfície livre;
μ	Viscosidade dinâmica;
ν	Viscosidade cinemática;
ρ	Densidade do fluido;
τ_{ij}	Tensões viscosas;
ω	Frequência angular.

Lista de abreviaturas e siglas

GRP	Poliéster reforçado a fibra de vidro, “ <i>Glass-Fibre-Reinforced Polyester</i> ”;
FFD	Ferro Fundido Dúctil;
PEAD	Polietileno de Alta Densidade;
RANS	Equações de Navier-Stokes em valor médio de Reynolds, “ <i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i> ”;
RMS	Valor quadrático médio, “ <i>Root-mean square</i> ”;
VIV	Vibrações induzidas pela vorticidade, “ <i>Vortex Induced Vibrations</i> ”;
VOF	Volume Of Fluid.

1. INTRODUÇÃO

Define-se como emissário submarino a tubagem submarina de descarga de efluentes domésticos, industriais ou de ambos. Na Fig. 1.1 encontra-se o perfil longitudinal-tipo de um emissário submarino.

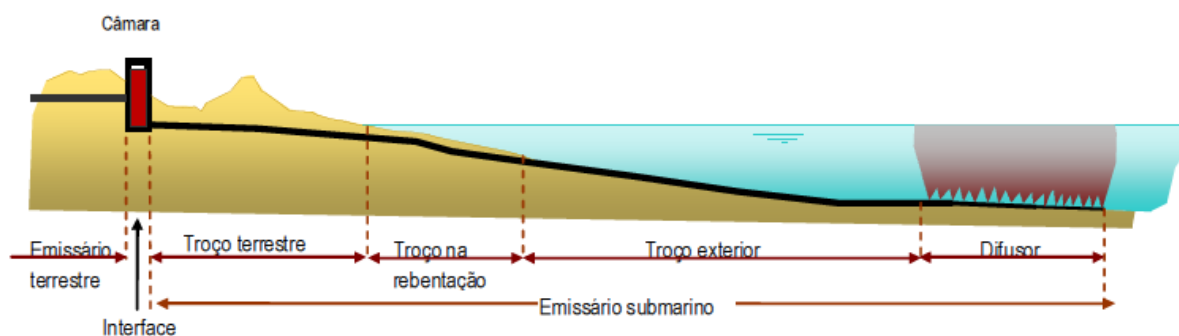


Fig. 1.1 - Perfil longitudinal-tipo de um emissário submarino (Afonso et al., 2007).

Estes emissários são normalmente constituídos por um troço enterrado em terra firme e na zona de rebentação, um troço assente no leito marinho e um último troço difusor. Na Fig. 1.2 pode ser visualizado o perfil transversal-tipo de um emissário enterrado em zona de rebentação.

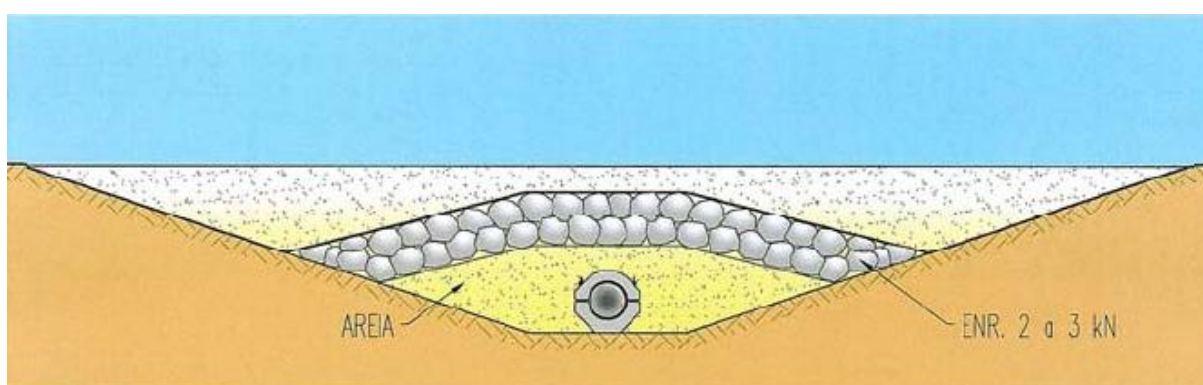


Fig. 1.2 - Perfil transversal-tipo de um emissário enterrado na zona de rebentação (Afonso et al., 2007).

Estes emissários podem ser de diversos materiais, sendo maioritariamente de PEAD (Polietileno de Alta Densidade), FFD (Ferro Fundido Dúctil), GRP (Poliéster reforçado a fibra de vidro) e aço revestido a betão e podem ser instalados no fundo marinho de diversas formas, tais como enterrados em vala, sendo posteriormente protegidos ou não por um quebra-mar submerso, ou por blocos de afundamento, conforme se pode visualizar na Fig. 1.3.



Fig. 1.3 - Aplicação dos blocos de afundamento num emissário (ETERMAR - Engenharia e Construção, 2010).

Posteriormente, a tubagem (ou troços da mesma) são afundados até à cota de projecto, ficando estáveis no leito marinho. Na Fig. 1.4 pode observar-se a fase anterior ao seu afundamento, estando nesta situação a tubagem já com todos os seus blocos de afundamento.



Fig. 1.4 - Instalação de emissário submarino, fase anterior ao seu afundamento (ETERMAR - Engenharia e Construção, 2010).

Na Fig. 1.5 encontram-se esquematizados os perfis longitudinal e transversal-tipo de um emissário estabilizado no leito marinho com recurso a blocos de afundamento.

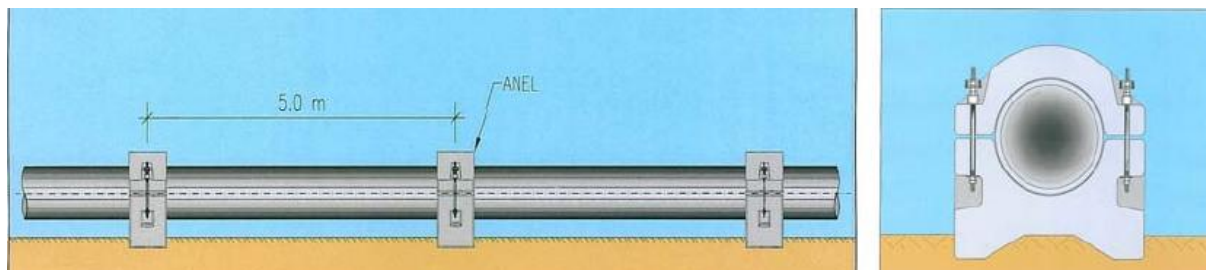


Fig. 1.5 - Perfis longitudinal e transversal-tipo de um troço de emissário estabilizado com recurso a blocos de afundamento (Afonso, C. et al, 2007).

No entanto, verificou-se que existiam lacunas em experiência nesta área, que resultaram em diversos acidentes e avultados prejuízos ambientais e económicos. Um dos campos onde se deve investir corresponde ao domínio do dimensionamento dos emissários, mais concretamente ao nível dos esforços actuantes nas condutas (Neves & Reis, 2003).

Sendo assim, este trabalho vem na sequência do trabalho desenvolvido por Nuno Mota intitulado *Influência da Direcção da Propagação na Pressão em Torno de um Quebra-Mar Submerso* (Mota, 2009), onde se estudou as forças num emissário, com a principal diferença do emissário da presente dissertação ser assente no leito marinho com recurso a blocos de afundamento e não protegido com um quebra-mar submerso. No presente estudo será considerada uma secção intermédia entre blocos, ou seja a secção circular do emissário. Não será assim considerada a influência dos blocos. Desta forma, o estudo consiste num estudo da interacção entre uma onda incidente a 90° na estrutura.

Para o estudo dos esforços no emissário, o presente trabalho recorre à aplicação do modelo numérico IH-2VOF, modelo bidimensional do Instituto de Hidráulica Ambiental da Universidade de Cantábria, Santander, que resolve as equações RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) e que recorre à técnica VOF (Volume Of Fluid) para modelar o escoamento com superfície livre. Pretende-se verificar a sua eventual aplicabilidade ao estudo da interacção onda-estrutura em emissários submarinos instalados no seio do fluido.

No presente trabalho foram simuladas condições de escoamentos estacionários para números de Reynolds de 200 e 1000, escoamentos oscilatórios com ondas de altura constante e períodos variáveis (20s, 60s, 90s e 130s) e ainda escoamento composto pela soma de componente permanente e oscilatória.

Esta dissertação é composta essencialmente por três partes, sendo a primeira uma introdução teórica aos fenómenos a serem abordados: escoamento estacionário, oscilatório e fenómeno da vorticidade. A segunda parte consiste na descrição resumida do modelo numérico IH-2VOF e da sua metodologia de aplicação e, por fim, a terceira parte consiste na aplicação do modelo aos casos de estudo e na apresentação e discussão dos resultados obtidos.

2. ESCOAMENTO EM TORNO DE CILINDROS

2.1 Escoamentos

Considerando a estrutura em estudo neste trabalho, o emissário submarino, a sua secção pode ser representado como uma circunferência. O cilindro pode estar sujeito a um escoamento estacionário devido a uma corrente uniforme ou, no caso do meio marítimo, sujeito a um escoamento oscilatório devido à agitação. As forças induzidas, assim como o próprio escoamento, variam conforme o tipo de escoamento a que o cilindro está sujeito.

2.1.1 *Escoamentos estacionários com corrente uniforme*

Num escoamento estacionário, as grandezas adimensionais que descrevem o escoamento em torno de um cilindro liso e circular dependem do número de Reynolds, Re , definido por:

$$Re = \frac{D U}{\nu} \quad (2.1)$$

em que D é o diâmetro do cilindro, U a velocidade do escoamento não perturbado e ν a viscosidade cinemática do fluido.

O escoamento em torno de um cilindro sofre grandes mudanças à medida que Re cresce. Tal pode ser verificado na Fig. 2.1, onde é ilustrada a topologia do escoamento para diferentes gamas de números de Reynolds, desde o regime laminar até o regime subcrítico.

Para $40 < Re < 200$, o escoamento é laminar e ocorre desprendimento de vórtices bidimensional (com esteira laminar). Com o aumento do Re , ocorre uma transição entre o regime laminar e o turbulento, verificando-se turbulência na esteira, sendo esteira a região a jusante do cilindro onde se verificam as perturbações do escoamento, tal como se pode ver no esquema apresentado na Fig. 2.2.




a)		Esteira de vórtices laminar	$40 < Re < 200$
b)		Transição para turbulência na esteira	$200 < Re < 300$
c)		Esteira completamente turbulenta. A: Separação da camada limite laminar	$300 < Re < 3 \times 10^5$ Regime subcrítico

Fig. 2.1 – Modos de desprendimento de vórtices para $40 < Re < 200$, $200 < Re < 300$ e regime subcrítico, $300 < Re < 3 \times 10^5$; Adaptado de Sumer & Fredsøe, 2006.

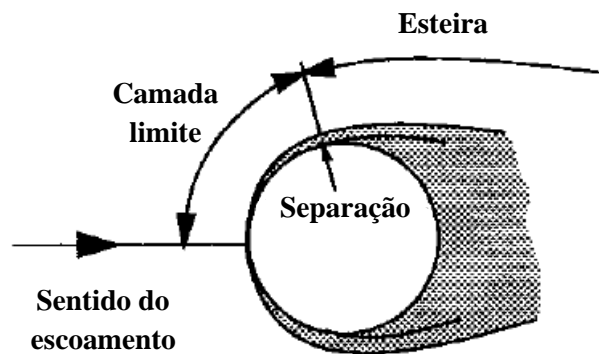


Fig. 2.2- Definição de esteira e camada limite; Adaptado de Sumer & Fredsøe, 2006.

A região de transição aproxima-se do cilindro quando Re aumenta para valores no intervalo $200 < Re < 300$ (Fig. 2.1b) sendo que, para este intervalo de Re , os desprendimentos de vórtices tornam-se manifestamente tridimensionais. Para $Re=400$ a esteira é já totalmente turbulenta, mas a camada limite permanece laminar até ao regime de escoamento subcrítico, $Re < 3 \times 10^5$ (Sumer & Fredsøe, 2006), em que se entende por camada limite a camada de fluido nas imediações de uma superfície delimitadora e em que se fazem sentir os efeitos de difusão e dissipação de energia (Fig. 2.2).

A característica mais importante dos regimes de escoamento descritos acima é o fenómeno de desprendimento de vórtices, comum para $Re > 40$. Para estes valores do Re , existem dois pontos de separação do escoamento, situados à volta de 115° do ponto de estagnação (Fig. 2.3 a)), ponto este que

é caracterizado por uma anulação de velocidade do escoamento sob uma superfície (admitindo um cilindro liso e uma taxa de turbulência quase nula a montante), devido a gradientes de pressão adversos induzidos pela geometria cilíndrica do corpo, típica de um corpo não fuselado, corpo este em que a separação é possível de ocorrer. Como consequência, forma-se uma camada de corte, que se inicia a partir dos dois pontos de separação, como se pode ver na Fig. 2.3b).

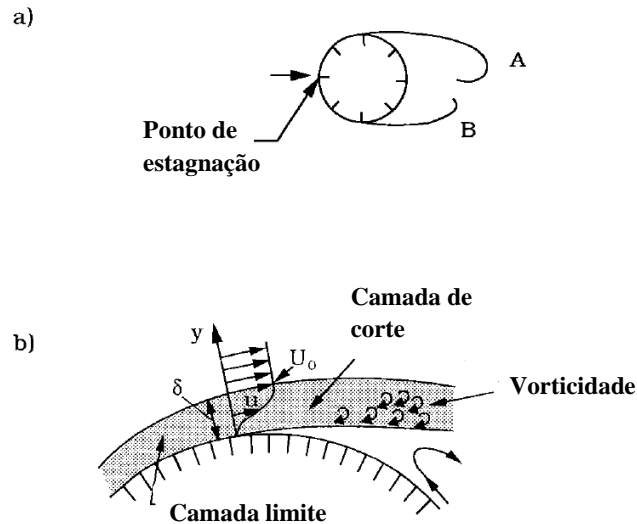


Figura detalhada de um escoamento na zona de separação

Fig. 2.3 – Detalhe das características do escoamento nas proximidades de um cilindro; Adaptado de Sumer & Fredsøe, 2006.

A camada limite formada ao longo das paredes do cilindro possui uma elevada vorticidade. Esta vorticidade é alimentada pela camada de corte formada a jusante do ponto de separação e provoca uma rotação desta camada de corte num vórtice com sinal igual ao da vorticidade de entrada (vórtice A da Fig. 2.3 a)). Por simetria do escoamento em torno do cilindro, forma-se um outro vórtice, com sentido contrário, no outro lado do cilindro (vórtice B da Fig. 2.3 a)). Consequentemente, para $Re > 40$, o par de vórtices assim formados é instável visto um deles crescer mais que o outro. Um dos vórtices, vórtice A, que gira no sentido horário (Fig. 2.3b)), vai atrair o vórtice B, que gira no sentido anti-horário, através da esteira tal como ilustra a Fig. 2.4 a).

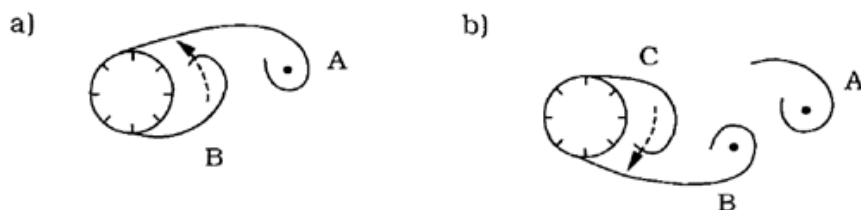


Fig. 2.4 - Mecanismo de formação de vórtices (Sumer & Fredsøe, 2006).

A aproximação de um vórtice de sinal contrário vai por fim anular a vorticidade de A sendo que, neste instante, ocorre o desprendimento do referido vórtice que se propaga para jusante pela corrente. Neste momento, o vórtice B faz o papel do vórtice A, cresce, e atrai um novo vórtice C (Fig. 2.4 b)) para a esteira. O processo repete-se e o vórtice B desprende-se, e assim sucessivamente com determinada periodicidade, conhecida como período de desprendimento do vórtice, f_v , e que será detalhada no ponto 2.3.1 (Sumer & Fredsøe, 2006).

2.1.2 *Escoamentos oscilatórios*

Na secção anterior foram abordados os escoamentos estacionários com corrente uniforme. No entanto, no caso de escoamentos devidos a uma onda, o escoamento não se processa da mesma maneira.

Visto estes escoamentos terem carácter oscilatório, o número de Reynolds deixa de ser a principal grandeza que os caracteriza, passando a ser o número de Keulegan-Carpenter, KC , definido como:

$$KC = \frac{U_m T}{D} \quad (2.2)$$

em que U_m é a velocidade máxima do escoamento não perturbado e T o período do escoamento oscilatório ou seja, o período da onda, e D o diâmetro do cilindro.

Se o escoamento for sinusoidal, com a velocidade dada por:

$$U = U_m \sin(\omega T) \quad (2.3)$$

em que ω é a frequência angular da onda, então a velocidade máxima é dada por:

$$U_m = a\omega = \frac{2\pi a}{T} \quad (2.4)$$

em que a é a amplitude de onda. Sendo assim, o número de KC , para um escoamento devido a uma onda sinusoidal pode ser dado por:

$$KC = \frac{2\pi a}{D} \quad (2.5)$$

O significado físico do número de KC pode ser explicado pela equação (2.5). O numerador é proporcional à amplitude do movimento, $2a$, enquanto o denominador é o diâmetro do cilindro. Pequenos números de KC indicam que o movimento orbital das partículas é pequeno quando comparado com o diâmetro do cilindro, o que leva a concluir que, quando KC é muito pequeno, a separação atrás do cilindro pode nem sequer ocorrer (Sumer & Fredsøe, 2006).

Sumer & Fredsøe (2006) caracterizam o escoamento em torno de cilindros para diversos valores de KC quando $Re=1000$. Observa-se que, neste regime, não há desprendimento de vórtices para $KC < 1,1$ (o escoamento é laminar). Para $1,1 < KC < 1,6$ verifica-se que o desprendimento ocorre com vórtices tipo Honji, vórtices estes com forma de cogumelo que se formam paralelamente ao sentido do escoamento e ao longo do comprimento do cilindro, conforme ilustrado na Fig. 2.5. No intervalo $1,6 < KC < 2,1$ ocorre a formação de um par de vórtices simétricos contra-rotativos. Entre $1,6$ e $KC < 4$ começa a verificar-se turbulência na superfície do cilindro. Quando $4 < KC < 7$, forma-se um par de vórtices assimétricos e, para $KC > 7$, ocorre desprendimento de vórtices.

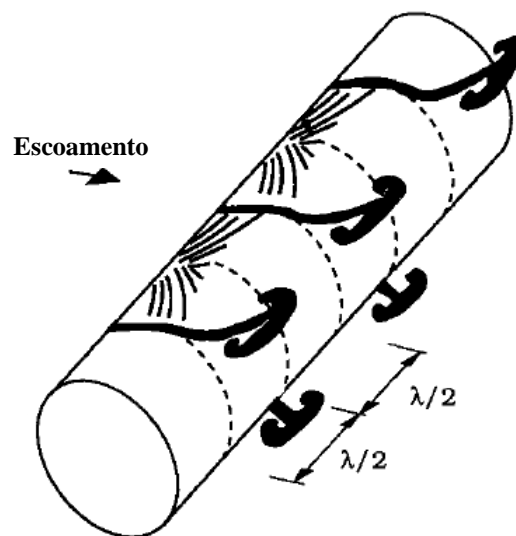


Fig. 2.5 - Vorticidade tipo Honji; Adaptado de Sumer & Fredsøe, 2006.

No caso ilustrado na Fig. 2.6, pode observar-se o modo de desprendimento de vórtices para um número de Keulegan-Carpenter entre 24 e 32, ou seja, $KC > 7$, ocorrendo desprendimento de vórtices.

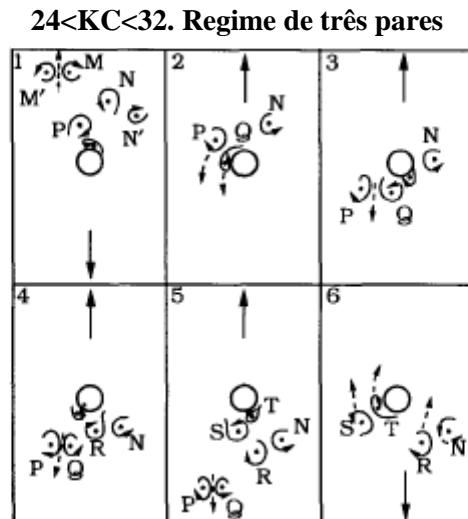


Fig. 2.6 - Desprendimento de vórtices para $24 < KC < 32$; Adaptado de Sumer & Fredsøe, 2006.

Na figura, as setas referem-se ao cilindro em movimento, mas os vórtices são vistos de um referencial que se move juntamente com o cilindro. A esteira é o resultado de três vórtices a desprenderem-se num semi-círculo e compreende três emparelhamentos de vórtice por ciclo (por exemplo vórtices P+Q, N+R e S+T (Sumer & Fredsøe, 2006). É também de salientar que para $KC \rightarrow \infty$ o escoamento assemelha-se ao caso de corrente estacionária.

2.2 Agitação marítima

2.2.1 Tipos de ondas e suas características

Uma onda marítima é uma perturbação oscilatória e periódica da superfície oceânica, sendo a principal força geradora o vento, através de forças de pressão e fricção que este exerce sobre a superfície oceânica. No entanto, existem outras forças geradoras tais como a força gravitacional exercida pelo Sol e pela Lua (forças de marés) ou deslocamentos do fundo oceânico ('tsunamis') (US Army Corps of Engineers, 2006).

No que diz respeito às ondas geradas pelo vento, estas têm como principal força restabeecedora a gravidade, não obstante as forças de Coriolis e de tensão superficial terem também uma influência marginal.

As ondas de vento, doravante denominadas por ondas, têm como principais características períodos entre 1s e 30s e crescerem proporcionalmente à intensidade do vento, dependendo da velocidade do mesmo, do fetch (superfície onde o vento incide) e da duração da tempestade.

Podem-se distinguir dois tipos de ondas – ondulação e vaga: a primeira é a onda na zona de geração e possui um largo espectro em frequência e direcções enquanto a segunda é o seu inverso, ocorre longe da zona de geração e possui um espectro estreito em frequência e direcção.

A agitação marítima é de natureza aleatória e irregular, composta por uma soma de ondas de diversas características e com diferentes direcções de propagação. Para analisar as características de um registo de elevação da superfície livre num determinado ponto, este pode ser tratada estatística e espectralmente. Na Fig. 2.7 podem ver-se as diversas grandezas que caracterizam uma onda no espaço.

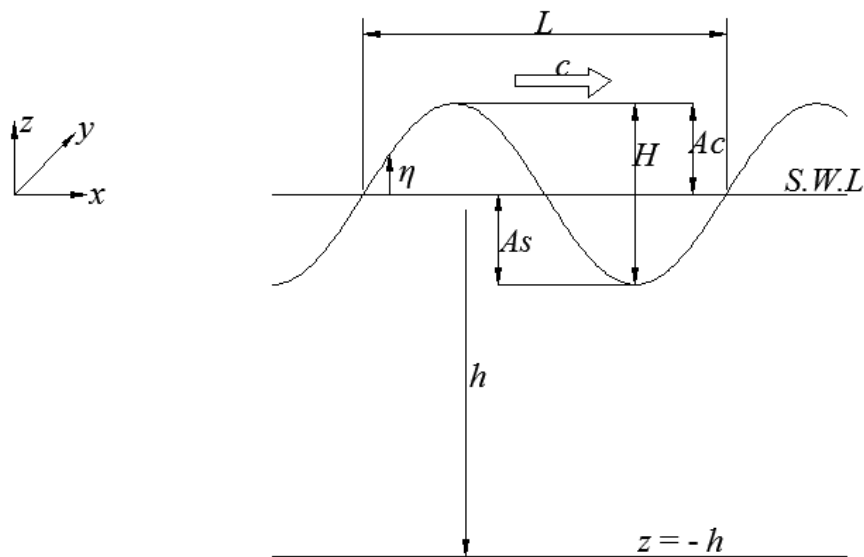


Fig. 2.7 - Parâmetros geométricos de uma onda

Na Fig. 2.7, os parâmetros geométricos são:

- Comprimento de onda, L (m) – distância horizontal de um ciclo completo;
- Altura de onda, H (m) – distância vertical entre a crista e a cava da onda;
- Amplitude da crista, A_c (m) – distância vertical máxima entre $S.W.L.$ e a crista;
- Amplitude da cava, A_s (m) – distância vertical máxima entre $S.W.L.$ e a cava;

- Elevação da superfície livre – representada pela letra η (m);
- Profundidade – representada pela letra h (m);
- Nível do mar em repouso, $S.W.L.$

Como principais grandezas derivadas pode-se destacar:

- Celeridade:

$$c = \frac{L}{T} \quad (2.6)$$

com c em metros por segundo e T em segundos;

- Frequência:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.7)$$

com f em hertz;

- Frequência angular:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.8)$$

com ω em radianos por segundo;

- Número de onda:

$$k_w = \frac{2\pi}{L} \quad (2.9)$$

com k_w em metros⁻¹;

Outra das características das ondas é a dependência de celeridade, da velocidade de grupo e da energia com a profundidade. A profundidade pode ser classificada em:

- Grandes profundidades, $h > L/2$;
- Profundidades intermédias, $L/2 < h < L/20$;
- Pequenas profundidades, $h < L/20$;

Uma óptima ferramenta de análise das ondas nas três profundidades acima referidas é a equação da dispersão, dada por:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (2.10)$$

Em grandes profundidades o comprimento de onda é menor que a profundidade, o que leva a que a parcela hiperbólica da equação tenda para a unidade. Assim sendo, pode-se concluir que o comprimento de onda apenas depende do período e, subsequentemente, que a celeridade apenas depende do período de onda. Nestas profundidades, o movimento das partículas que formam uma onda é circular, sendo que a influência da onda é cada vez menor à medida que a profundidade aumenta.

Em profundidades intermédias a relação entre a profundidade e o comprimento de onda diminui, o que leva a que, para estas profundidades, o mesmo comprimento de onda dependa não só do período mas também da profundidade e, consequentemente, a celeridade da onda dependerá do comprimento de onda e da profundidade. Nestas profundidades, o movimento das partículas é elíptico e a onda sofre cada vez mais influência da profundidade. Em pequenas profundidades o comprimento de onda é maior que a profundidade, o que leva a uma anulação da parcela hiperbólica da equação da dispersão, dependendo então o comprimento de onda apenas da profundidade. Nestas profundidades as ondas sofrem uma redução do seu comprimento tal como da sua celeridade com a diminuição da profundidade, bem como um aumento da altura de onda em relação ao seu comprimento de onda.

De modo a analisar melhor as características da onda, há que a caracterizar segundo diversos parâmetros, sendo os mais importantes:

- Altura relativa,

$$\delta = H/h \quad (2.11)$$

- Declividade da onda

$$\varepsilon_D = H/L \quad (2.12)$$

A altura relativa expressa a relevância da oscilação vertical da onda na profundidade e a declividade indica a variação do movimento vertical num dado comprimento de onda.

Estes dois parâmetros são essenciais para uma correcta caracterização de uma onda, sendo que para $\varepsilon_D \ll 1$ esta apresenta um movimento de pequena amplitude – dito linear - e para ε_D aproximadamente igual à unidade apresenta uma amplitude infinita – dita não linear.

Esta distinção está na base da escolha da teoria de onda a utilizar em cada caso, tema que será objecto de análise mais detalhada no ponto 2.2.2.

2.2.2 Teorias de onda

As diversas teorias de onda existentes podem ser agrupadas em dois grandes grupos: as teorias lineares e as não lineares. Na Fig. 2.8 apresentam-se as várias teorias de onda e o âmbito de aplicação das mesmas. É de salientar que “ d ” não é mais do que h , profundidade.

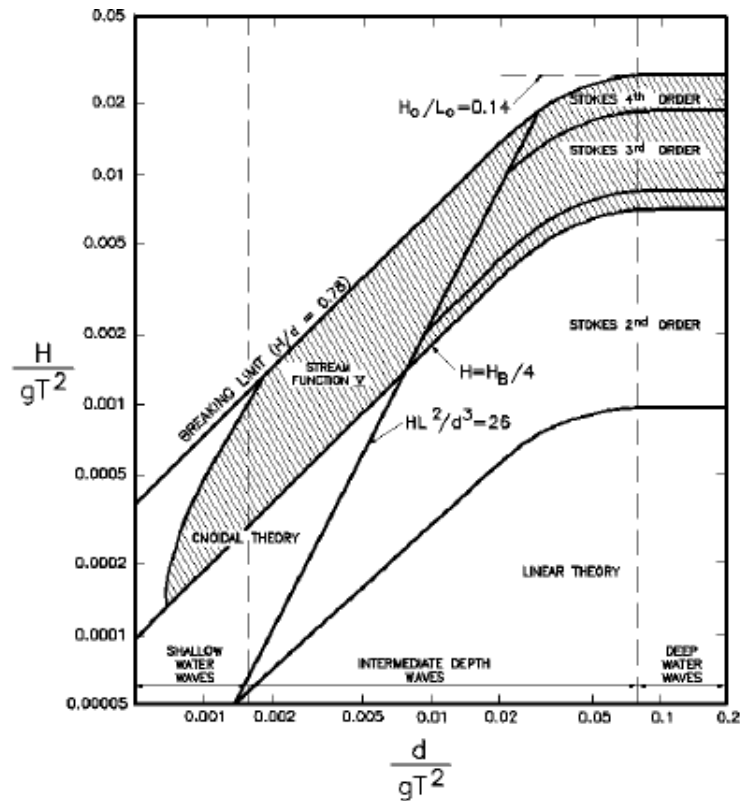


Fig. 2.8 - Ábaco do âmbito de aplicação das diversas teorias de onda (US Army Corps of Engineers, 2006).

A teoria linear é também conhecida como teoria de Airy ou Stokes I. Nas teorias não lineares encontram-se as teorias de Stokes de ordem superior (Stokes II, III e IV) e Cnoidal.

As ondas de pequena amplitude, $\varepsilon_D \ll 1$, apresentam um carácter linear sendo válida neste caso a teoria de Airy ou de Stokes I. Com o aumento de ε_D aumenta o carácter não linear das mesmas. Neste caso passam a ser válidas as teorias de Stokes de ordem superior, tais como Stokes II, III, IV ou Cnoidal (US Army Corps of Engineers, 2006).

2.3 Interacção onda-estrutura

2.3.1 Grandezas envolvidas

Um cilindro fixo num escoamento com velocidade U (constante ou variável) sofre uma força com a direcção e sentido do escoamento e ainda forças transversais à direcção desse mesmo escoamento (Sumer & Fredsøe, 2006).

Estas forças podem ser classificadas em três tipos:

- Forças de arrasto, F_D ;
- Forças de massa ou inércia, F_I ;
- Forças de sustentação, F_L ;

Desprezando a contribuição das forças de inércia e as parcelas de viscosidade, as forças F_D e F_L podem ser calculadas com base nas equações (2.13) e (2.14).

$$F_D = \int p \, dA \quad (2.13)$$

$$F_L = \int p \, dA \quad (2.14)$$

em que p é a pressão e A a área.

Seguidamente, podem definir-se os coeficientes adimensionais de arrasto e sustentação (C_D e C_L respectivamente) de uma força como

$$C = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho U^2 L_C D} \quad (2.15)$$

em que F é a força (F_D ou F_L), ρ a massa volúmica do fluído, U a velocidade do escoamento, L_C o comprimento do cilindro (igual à unidade no presente caso de estudo) e D o diâmetro do cilindro.

A frequência de desprendimento de vórtices, f_v , quando normalizada com a velocidade do escoamento, U , e o diâmetro do cilindro, D , pode ser descrita pelo chamado número de Strouhal, St , grandeza adimensional definida como:

$$St = \frac{f_v D}{U} \quad (2.16)$$

em que f_v é obtida através da série temporal do C_L e a mesma deverá ser periódica.

2.3.2 *Variação de grandezas devido a variações do escoamento e da agitação*

As grandezas definidas no ponto 2.3.1 não são, como seria de esperar, constantes ao longo do tempo. No entanto, as suas variações não são iguais caso se trate de um caso de corrente estacionária ou escoamento oscilatório.

Analisando o primeiro caso, corrente uniforme, considerando D e v constantes, e U crescente (consequentemente Re crescente), é de esperar um aumento das pressões em torno do cilindro e, consequentemente, também as forças de arrasto e de sustentação. Considerando ρ constante, e sendo os coeficientes C_D e C_L linearmente dependentes das respectivas forças, é de esperar que estes aumentem proporcionalmente às respectivas forças, não obstante a sua periodicidade se mantenha.

No caso de uma corrente periódica, gerada pelo movimento oscilatório das ondas, as diferenças são significativas, começando pelo facto dos valores médios do C_D e C_L serem aproximadamente zero. Tal pode ser explicado pelo carácter oscilatório da corrente, uma vez que o campo de velocidades em torno do cilindro varia periodicamente, dependendo do período da onda.

Quanto à variação do Número de Strouhal com o número de Reynolds, esta pode ser verificada na Fig. 2.9. Neste gráfico pode observar-se que o número de Strouhal aumenta até $Re=300$ sendo que, após esse valor, mantém-se aproximadamente constante no regime subcrítico, até $Re \sim 3 \times 10^5$. Para esse valor de Re ocorre a chamada “drag crisis”, ou seja, um aumento de St para mais do dobro no seu valor, o início do regime supercrítico. Neste regime o referido valor volta a descer ligeiramente, sendo que posteriormente volta a aumentar, para $Re=3 \times 10^6$, no início do regime transcrito.

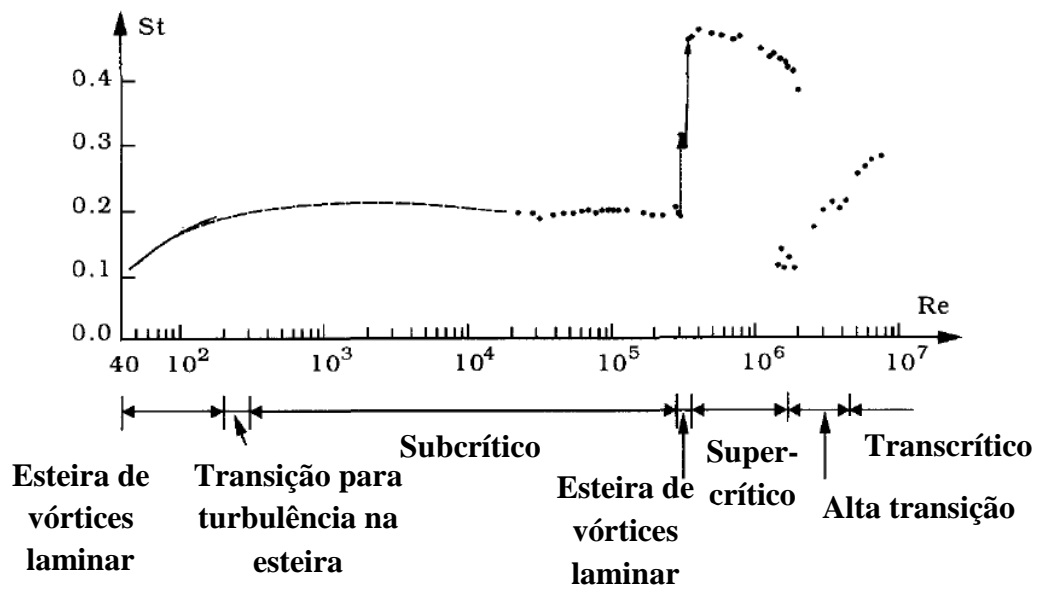


Fig. 2.9 - Número de Strouhal em função de Re para um cilindro liso e circular; Adaptado de Sumer & Fredsøe, 2006.

3. MODELO NUMÉRICO IH-2VOF

3.1 Introdução

O Modelo IH-2VOF é um modelo numérico bidimensional que resolve as equações de Navier-Stokes em valor médio de Reynolds (RANS) em conjunto com um modelo de turbulência k-ε algébrico não linear (Lara et al., 2006). Este modelo conta também com um método de definição da superfície livre baseado no método VOF – Volume Of Fluid.

Conjugando ambas as características do modelo (resolução das equações RANS e descrição da superfície livre - VOF) este permite, entre outros:

- Caracterizar escoamentos em meios porosos e/ou em torno de obstáculos rígidos;
- Estudar fenómenos de vorticidade em estruturas submersas;
- Estudar a interacção onda-estrutura como, por exemplo, fenómenos de galgamento, espraçamento, bem como a evolução das pressões hidrodinâmicas em estruturas;
- Introduzir sondas, ditas numéricas, de modo a simular sondas reais.

Assim, o modelo IH-2VOF permite simular um canal bidimensional e obter, entre outros, valores de grandezas relevantes do escoamento, tais como a pressão e velocidades no tempo e em diversos pontos do domínio computacional.

3.2 Equações que regem o modelo

Tal como foi referido, no presente modelo utilizam-se as equações de RANS, que derivam das equações de Navier-Stokes, considerando que os campos de velocidades e pressões do fluido para um escoamento se podem decompor na sua componente média e numa flutuação turbulenta, expressas na forma:

$$U_i = \bar{u}_i + u_i' \quad (3.1)$$

$$p = \bar{p} + p' \quad (3.2)$$

em que \bar{u}_i representa a componente média da velocidade, u'_i a componente de flutuação turbulenta, $i=1,2$ num dado escoamento bidimensional, \bar{p} representa a componente média da pressão e p' a componente de flutuação turbulenta.

De uma forma geral, podem-se representar as equações RANS na seguinte forma:

- Equação de continuidade:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.3)$$

- Equação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (3.4)$$

onde g_i é a aceleração da gravidade segundo a direcção i .

As tensões viscosas, $\bar{\tau}_{ij}$, são dadas por:

$$\bar{\tau}_{ij} = 2\mu S_{ij} + \rho \overline{u'_i u'_j} \quad (3.5)$$

em que

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.6)$$

e $\mu = \nu \rho$ é a viscosidade dinâmica e ν a viscosidade cinemática.

A condição cinemática no contorno vem dada por:

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} = 0 \quad (3.7)$$

Conforme referido em 3.1, o modelo numérico inclui um modelo de turbulência $k-\varepsilon$. Todavia, este não será aplicado na presente dissertação.

A superfície livre é descrita através de uma função VOF, descrita na forma:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uF) + \frac{\partial}{\partial y}(vF) = 0 \quad (3.8)$$

em que $\rho(x,y,t)=F(x,y,t)\rho_f$, $\rho(x,y,t)$ é a densidade da célula e ρ_f é a densidade do fluido.

3.3 Conceitos base

Para a aplicação do modelo, onde se resolvem as equações descritas no ponto anterior, é necessário dispor de um conjunto de procedimentos que permitem uma correcta aplicação do mesmo.

Para tal é necessário preparar os dados que descrevem o caso de estudo: geometria e condições de agitação. A geometria e os pontos onde se irão resolver as equações, são descritos através de uma malha de cálculo computacional, malha esta com requisitos próprios explicados no seguinte ponto.

Como dados deste modelo é necessária também as características de agitação marítima, que é gerada através do método do batedor numérico, que consiste em definir, na fronteira de entrada do domínio computacional, a variação de superfície livre no tempo bem como as velocidades horizontais e verticais devidas à agitação no tempo e em cada ponto da malha da secção de barlar do domínio.

Nos casos em que não se pretenda considerar agitação, há que introduzi-la como dado do programa mas com os valores da variação da superfície livre e das velocidades no tempo nulos.

No caso de se pretender simular um escoamento uniforme estacionário, estas são definidas apenas no ficheiro de dados (ficheiro ‘*input*’, explicado no ponto 3.5). De salientar que, como o modelo está vocacionado para ondas e não correntes, estas terão de ter um valor reduzido, dado que a aceleração do escoamento leva a uma redução do nível da superfície livre, podendo levar a que não haja conservação da massa no modelo, como se pode observar na Fig. 3.1, onde se apresenta o campo de velocidades horizontais instantâneas para uma corrente uniforme de 0,5 m/s.

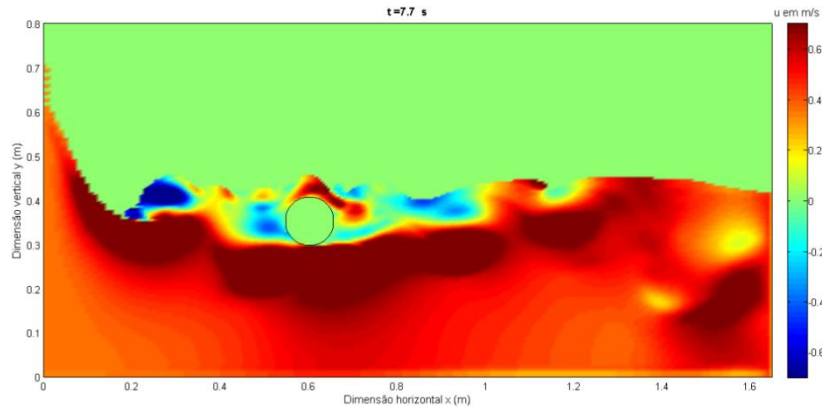


Fig. 3.1 – Campo de velocidades horizontais instantâneas para uma corrente estacionária de 0,5 m/s.

Por fim, é necessário definir um conjunto de parâmetros de entrada, parâmetros estes explicados no ponto 3.5.

Na Fig. 3.2 apresenta-se um diagrama explicativo de todo o processo relativo a uma correcta aplicação do modelo numérico IH-2VOF.

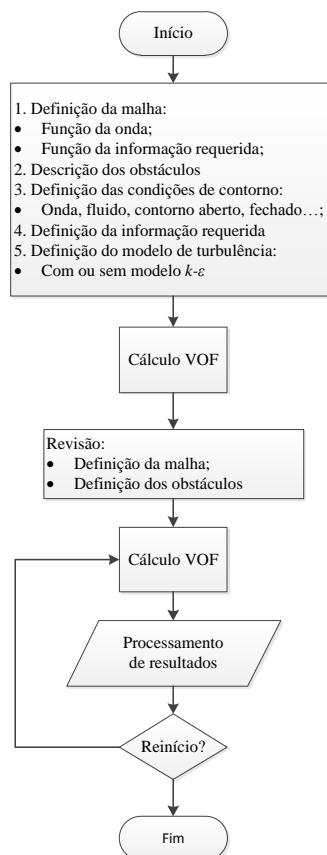


Fig. 3.2 - Fluxograma sequencial da aplicação do modelo IH-2VOF (adaptado de Lara et al., 2006).

3.4 Domínio computacional e definição da malha

Conforme referido no ponto 3.1, o domínio de cálculo computacional do modelo IH-2VOF é de características bidimensionais, em que a dimensão horizontal representa o sentido do escoamento e/ou a direcção de propagação da agitação imposta e a dimensão vertical a altura da coluna de água acrescida de uma certa margem.

Este domínio computacional é representado através de uma malha rectangular cartesiana que pode ter diferentes subzonas de dimensões diferentes segundo cada direcção, sendo que cada célula da malha definida é caracterizada pelas suas dimensões dx e dy , consoante se refira à dimensão segundo a direcção horizontal ou vertical, tal como se exemplifica na Fig. 3.3.

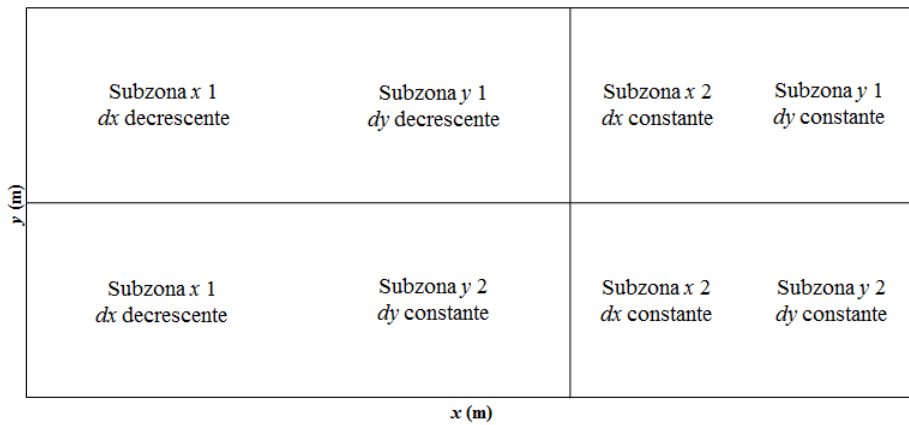


Fig. 3.3 - Esquema de subzonas em x e em y de um dado domínio computacional.

Cada célula é também caracterizada por um conjunto de grandezas que definem as condições do escoamento. As grandezas escalares, tais como a função VOF (F), a energia cinética turbulenta (k), a taxa de dissipação (ϵ) e a pressão (p) são definidas no centro de cada célula, enquanto que grandezas vectoriais como as velocidades em x e y , u_x e u_y , são definidas nas faces direita e superior, respectivamente da célula Fig. 3.4.

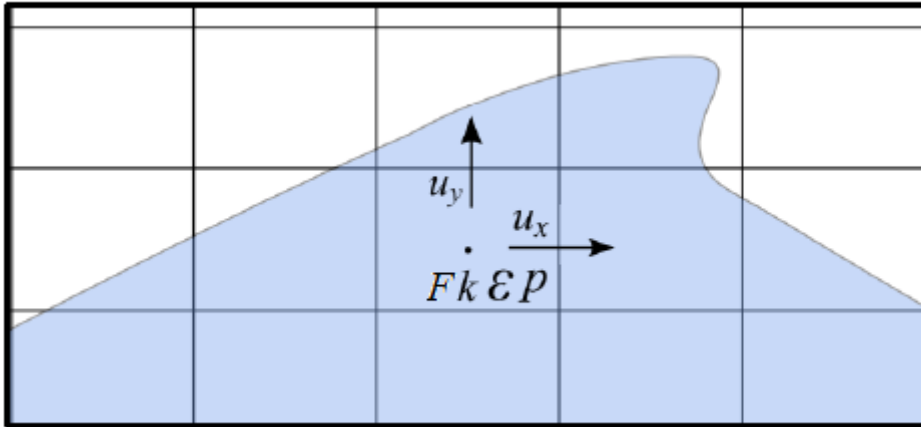


Fig. 3.4 - Esquema da definição das diversas grandezas calculadas por célula.

Dado que, nesta tese, apenas se pretende estudar a interação do fluido com o emissário, não há necessidade de ter um domínio igualmente refinado em toda a malha, reduzindo-se assim o tempo de cálculo sem comprometer o objectivo de ter uma malha suficientemente detalhada na zona de interesse.

As malhas de cálculo utilizadas na presente dissertação foram definidas na ferramenta CORAL, cujo interface será alvo de explicação no Anexo A. No entanto, o manual do modelo especifica uma série de recomendações de modo a serem evitados erros numéricos:

- As dimensões dx e dy de células adjacentes não devem ser superiores a 10-20%;
- A relação entre os lados das células – dx/dy – deve estar compreendida entre 0,5 e 2;
- Numa sub-malha variável a diferença de dimensões entre duas células adjacentes tem de ser menor que 5%. Tal condição é satisfeita se $dx^2 < 0,05$ e $dy^2 < 0,05$;

As estruturas são também definidas na ferramenta CORAL, através da inserção de pontos. Todavia, esta inserção pode também ser manual, editando em editor de texto o ficheiro ‘*malha1.dat*’.

3.5 Dados de entrada e saída do modelo

Os dados de entrada do modelo IH-2VOF estão definidos nos ficheiros ‘*malha1.dat*’ e ‘*mesh.mes*’ gerados pelo software CORAL e ‘*eta_ext.dat*’, ‘*u_ext.dat*’ e ‘*v_ext.dat*’ gerados pelo batedor numérico e, por fim, o ficheiro ‘*input*’.

Os dois primeiros ficheiros dizem respeito à malha computacional e respectivos parâmetros, tais como as características do domínio e a definição dos obstáculos.

Os ficheiros '*eta_ext.dat*', '*u_ext.dat*' e '*v_ext.dat*', gerados pelo batedor numérico na fronteira do domínio, contêm as séries temporais de elevação da superfície livre e campos de velocidade, horizontal e vertical, respectivamente. Estas séries temporais dependem das condições de agitação imposta sendo que, tal como referido anteriormente, no caso de se pretender uma ausência de agitação, devem posteriormente ter todos os seus valores igualados a zero. Esta agitação é criada segundo o método do batedor numérico, recorrendo à ferramenta '*GUI generacion*' compilada em MATLAB e detalhada no Anexo B. A mesma funciona correndo o ficheiro '*generador.fig*'. Para tal, primeiro define-se a onda (onda regular neste caso) e seus parâmetros (H , T , h), a dimensão da série temporal, a frequência de amostragem e a fase. Define-se posteriormente do tipo de batedor (estático neste caso) e seus parâmetros – h , tempo de início suavizado t , teoria de onda a utilizar e uso ou não da correcção da Deriva de Stokes.

Por fim, o ficheiro '*input*' contém as opções de cálculo do modelo IH-2VOF.

Este ficheiro é dividido em 12 secções, sendo as mais importantes e relevantes para os presentes casos as seguintes:

- Parâmetros numéricos;
- Parâmetros do fluido;
- Parâmetros de onda;
- Formato dos ficheiros de saída;
- Modelo de turbulência;
- Método de rastreio da superfície livre;

Nos parâmetros numéricos são definidas variáveis tais como o tempo de simulação, o passo de tempo de escrita e as condições de fronteira do domínio.

Nos parâmetros do fluido define-se a viscosidade cinemática do mesmo, acelerações e velocidades em ambas as direcções, bem como as velocidades nos contornos de injeção/extracção de fluido.

Nos parâmetros de onda define-se, entre outros, para a altura de água presente no modelo, a altura e período da onda.

Definem-se ainda variáveis como o número total de células na dimensão horizontal e vertical do domínio, o número e a posição (segundo a direcção x) das sondas numéricas e parâmetros referentes ao modo de escrita dos dados.

O modelo de turbulência, no presente caso de estudo, não é utilizado.

Por fim, no método de rastreio da superfície livre define-se a variável com o valor unitário, correspondendo assim à utilização da função VOF.

Conforme referido anteriormente, todas as grandezas são calculadas ao nível de cada célula, ora no seu centro ora nos contornos esquerdo e superior (caso das velocidades).

O modelo IH-2VOF produz resultados agrupados em dois grandes grupos: ficheiros das sondas numéricas e ficheiros ‘.dat’.

Os ficheiros das sondas numéricas apresentam os resultados apenas numa dada posição horizontal e para a totalidade da dimensão vertical. Os dados de saída das sondas são ficheiros separados por tabulações que podem facilmente ser abertos e analisados em EXCEL.

Os ficheiros do tipo ‘.dat’ contém todos os valores de k , p , t , u , $vortex$ e w , sendo k a energia cinética turbulenta, p a pressão, t a função VOF, u a velocidade horizontal, $vortex$ a vorticidade e w a velocidade vertical, para o domínio de resultados pretendido ao longo do tempo. Na Fig. 3.5 pode observar-se um exemplo do resultado do modelo no que respeita às velocidades horizontais para um dado instante, em que cores quentes significam velocidades positivas e frias velocidades negativas.

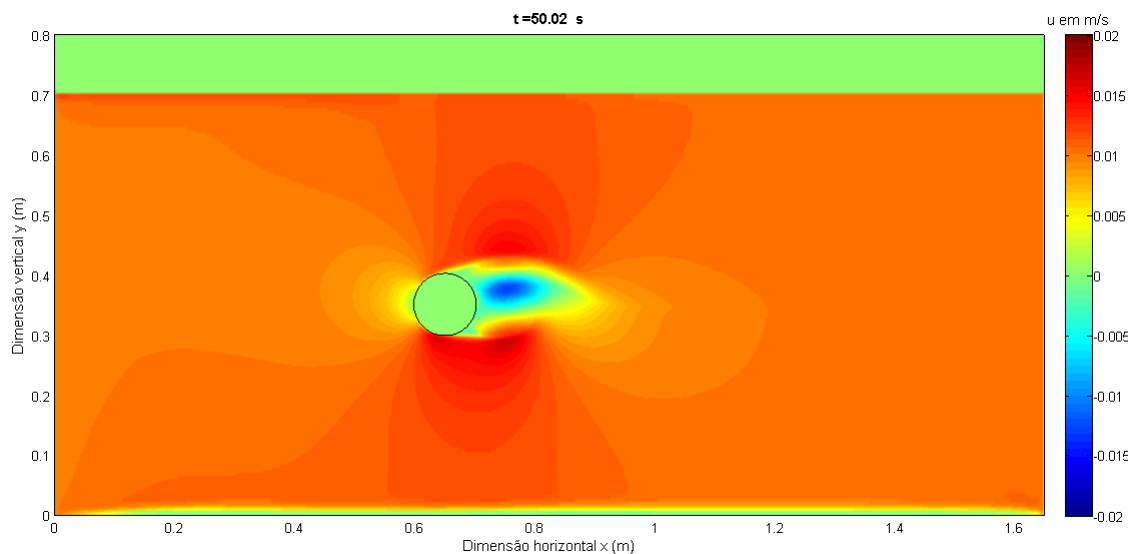


Fig. 3.5 - Representação de resultados de velocidade horizontal no domínio obtidos pelo modelo IH-2VOF para $Re=1000$.

4. APLICAÇÃO DO MODELO IH-2VOF

4.1 Enquadramento do estudo

O presente caso de estudo consiste na aplicação do modelo IH-2VOF ao estudo da interação onda-estrutura. Neste caso a estrutura é um emissário submarino que está sujeito a condições só de agitação, só de corrente uniforme ou à combinação corrente-agitação. Este estudo incide sobretudo na análise dos campos de velocidades a jusante e montante do cilindro, bem como nas pressões desenvolvidas no contorno do cilindro e respetivas forças.

De notar ainda que o fluido em estudo é a água doce e não a salgada, facto justificado com a possibilidade de uma melhor comparação de resultados com outros já existentes na literatura provenientes de ensaios em modelo físico.

4.2 Metodologia

Para uma correcta aplicação do IH-2VOF há que seguir uma série de procedimentos detalhados anteriormente.

Em primeiro lugar, a malha computacional deve ser gerada (*malha1.dat*) e o ficheiro *mesh.mes*, com recurso ao software CORAL. Esta malha tem determinadas características específicas para uma correcta aplicação do caso em estudo, sendo a sua definição alvo de detalhe no ponto 4.5.

O passo seguinte consiste na definição das condições do escoamento. Neste trabalho consideraram-se duas condições distintas: corrente e agitação.

Por fim, executa-se a aplicação *IH-2VOF.exe* de modo a iniciar a simulação.

4.3 Corrente

As condições de corrente uniforme são definidas no ficheiro ‘*input*’. Para os casos em que o escoamento é só devido a uma corrente uniforme, sem influência da onda, foi necessário especificar no referido ficheiro que os contornos esquerdo e direito do domínio são de injeção e extracção de fluido, respectivamente. Este dado mantém-se válido para os casos em que o escoamento se processa com influência de uma dada onda.

No entanto, para os casos em que apenas se considera onda, foi necessário definir como contorno de injeção de fluido o contorno esquerdo uma vez que, sendo a onda periódica, há conservação da massa no modelo.

Tentou-se ainda inserir a velocidade da corrente não no ‘*input*’ mas sim no batedor. Todavia, os resultados deste método apresentavam incongruências com o modelo de escoamento pretendido bem como um comportamento não expectável do mesmo.

4.4 Agitação

No presente estudo foram consideradas condições de agitação com muito baixa altura de onda e período elevado, de modo a influenciar o menos possível o escoamento à profundidade do emissário.

As condições de agitação relevantes consideradas no presente estudo foram:

- $H=0,01\text{m}$, $T=130\text{s}$;
- $H=0,01\text{m}$, $T=90\text{s}$;
- $H=0,01\text{m}$, $T=60\text{s}$;
- $H=0,01\text{m}$, $T=20\text{s}$.

Estas condições de agitação configuram uma situação de onda em pequenas profundidades na maioria dos casos, consequentemente, o seu perfil de velocidades na vertical é aproximadamente constante.

Estas condições de agitação foram, no entanto, geradas segundo a teoria de ondas de Airy, ou teoria linear.

Esta mesma teoria assume as seguintes condições (Engineers, 2006):

- O fluido é homogéneo e incompressível e a densidade ρ é constante;

- A tensão superficial pode ser ignorada;
- O efeito de Coriolis devido à rotação da Terra pode ser também ignorado;
- A pressão na superfície livre é uniforme e constante (pressão atmosférica);
- O fluido é ideal ou invíscido;
- O escoamento é irrotacional;
- O fundo é horizontal, impermeável e fixo, o que implica que a velocidade vertical no mesmo seja nula;
- A amplitude de onda é pequena e a forma da onda é invariante no tempo e no espaço;
- As ondas são planas ou de crista longa – bidimensionais.

4.5 Geometria e domínio computacional

Os domínios de cálculo computacional e respectivas malhas foram definidos com base nas recomendações do manual do modelo IH-2VOF descritas acima no ponto 3.4.

Foram definidas duas malhas de cálculo, fina e grosseira, sendo uma mais refinada que a outra, de modo a tentar verificar a influência da discretização da malha nos resultados. Cada malha é composta por seis subzonas, três segundo a direcção horizontal e três segundo a direcção vertical. No Quadro 4.1 estão representadas as dimensões do domínio de cálculo e nos Quadro 4.2 e Quadro 4.3 as subzonas em x e y , respectivamente.

Quadro 4.1- Dimensões dos domínios de cálculo. Valores em metros.

Dimensões do domínio computacional		
Malha	Comprimento	Altura
Grosseira	1,65	0,8
Fina	1,65	0,8

Quadro 4.2 - Subzonas em x das malhas de cálculo computacional. Valores em metros.

Subzonas em x						
subzona 1			subzona 2		subzona 3	
Malha	Comprimento	dx max	Comprimento	dx	Comprimento	dx max
Grosseira	0,45	0,01	0,4	0,005	0,8	0,01
Fina	0,5	0,005	0,4	0,002	0,75	0,005

Quadro 4.3 - Subzonas em y das malhas de cálculo computacional. Valores em metros.

	Subzonas em y					
	subzona 1		subzona 2		subzona 3	
Malha	Comprimento	dy max	Comprimento	dy	Comprimento	dy max
Grosseira	0,3	0,011	0,3	0,005	0,2	0,011
Fina	0,35	0,005	0,2	0,002	0,25	0,005

As subzonas centrais, subzonas 2, são regulares em x e em y e com igual espaçamento entre células. A dimensão da zona de malha de menor dimensão foi escolhida de modo a garantir um espaçamento uniforme em redor do emissário desde um diâmetro a jusante do emissário até dois diâmetros a montante do mesmo. As restantes subzonas contêm células de dimensão variável, crescente até às fronteiras do domínio.

O domínio de cálculo mais grosseiro é representado por uma malha com 246 células em x e 126 em y – 30996 nós, enquanto o mais fino é representado por 557 células em x e 263 em y – 146491 nós. Como seria de esperar, esta última leva a um maior tempo de cálculo, mas tal acréscimo de tempo entre simulações com diferentes malhas poderá conduzir a melhores resultados. Esta análise de sensibilidade está apresentada nos pontos 5.1.1e 5.2.1.

Após a definição das subzonas, é necessário definir o nível de água em repouso ($S.W.L.$), que foi mantido em todas as simulações igual a 0,8m. O último passo da definição das malhas consiste na definição do emissário submarino, que na presente dissertação tem 0,1m de diâmetro. No Quadro 4.4 apresenta-se a posição do centro do cilindro nas duas malhas de cálculo.

Quadro 4.4 - Coordenadas do centro do cilindro.

Malha grosseira		Malha fina	
X_c (m)	Y_c (m)	X_c (m)	Y_c (m)
0,6	0,35	0,65	0,35

Inicialmente, o cilindro foi desenhado na ferramenta AUTOCAD e os pontos foram definidos através de iguais rotações de $11,25^\circ$ de um quadrado inscrito no mesmo, perfazendo um total de trinta e dois pontos.

No entanto, no decorrer da análise preliminar dos diversos valores obtidos, constatou-se que o diâmetro real nas discretizações não correspondia aos referidos 0,1m, sendo que, no caso da malha grosseira, o diâmetro discretizado era de 0,09m e na malha fina de 0,096m.

Esta análise foi baseada num método expedito simples, no qual se substituíam as pressões no contorno por um ou por dois, consoante o caso, de modo a que, no final, a soma, tanto das forças horizontais como verticais, fosse igual ao diâmetro do cilindro, isto é, 0,1m.

Assim, para a verificação das forças horizontais, Fig. 4.1, considerou-se:

- Células do semi-círculo esquerdo iguais a dois;
- Células do semi-círculo direito iguais a um;

Para a verificação das forças verticais, Fig. 4.2, considerou-se:

- Células do semi-círculo superior iguais a um;
- Células do semi-círculo inferior iguais a dois;

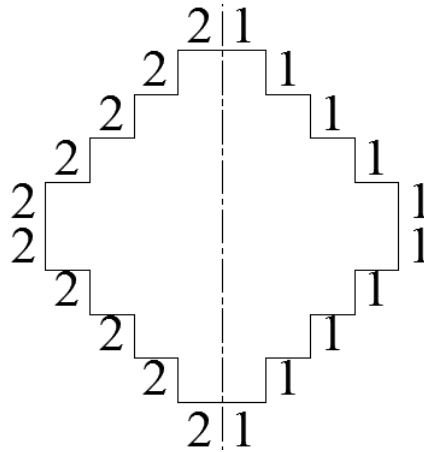


Fig. 4.1 - Esquema de verificação das forças horizontais.

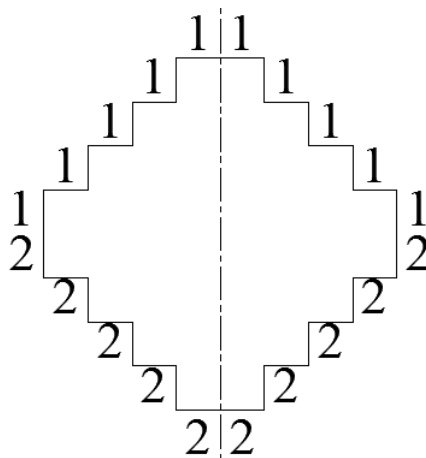


Fig. 4.2 - Esquema de verificação das forças verticais.

Como nem todas as pressões têm componente segundo x e y, haverá células que, para o caso das forças horizontais, terão as suas pressões multiplicadas por zero como é o caso das células dos topos superior e inferior, que só têm componente vertical. Assim sendo, pode ser criado um vector de dx auxiliar, que devolverá 0 se a célula não tiver contorno horizontal, 1 se o contorno for positivo e -1 se o mesmo for negativo. Posto isto, efectua-se a soma das forças e verifica-se se essa soma é igual ao diâmetro do cilindro considerado. O mesmo ocorre para as forças verticais, em que se cria um vector de dy auxiliar, que devolverá 0 se a célula não tiver contorno vertical, 1 se o contorno for positivo e -1 se for negativo.

De modo a obviar este problema acrescentou-se os 0,01m remanescentes ao diâmetro do cilindro da malha grosseira e 0,004m no caso da malha fina. Após nova verificação, constatou-se que os novos diâmetros discretizados possuíam de facto o diâmetro pretendido.

4.6 Sondas numéricas

As sondas numéricas, conforme explicado no ponto 4.2, são sondas que registam todos os valores gerados pelo modelo numa dada coluna para uma dada coordenada horizontal constante. Estas são de especial importância pois permitem, de uma maneira relativamente simples, analisar os dados processados pelo modelo.

Para as simulações efectuadas, a posição escolhida para as mesmas foi criteriosamente definida em secções relevantes, tais como contorno esquerdo, direito, e envolvente do cilindro.

As sondas colocadas na envolvente do cilindro, perfazendo assim um total de nove (ver Quadro 4.5), foram definidas tendo como base a sua distância ao mesmo:

- $1/2 D$ a montante;
- Última célula do contorno a montante;
- Centro do cilindro;
- Primeira célula do contorno a jusante;
- $1/2 D$, D e $3/2 D$ a jusante;

Quadro 4.5 – Coordenadas das posições das sondas numéricas. Valores em metros

Sondas			
Malha grosseira		Malha fina	
Sonda	x	Sonda	x
1	0,000	1	0,000
2	0,500	2	0,550
3	0,548	3	0,599
4	0,600	4	0,650
5	0,653	5	0,701
6	0,700	6	0,750
7	0,750	7	0,800
8	0,80	8	0,850
9	1,640	9	1,640

Na Fig. 4.3 e Fig. 4.4 encontram-se resumos esquematicamente os domínios de cálculo com a respectiva posição da superfície livre, emissário, sondas e dimensões das subzonas.

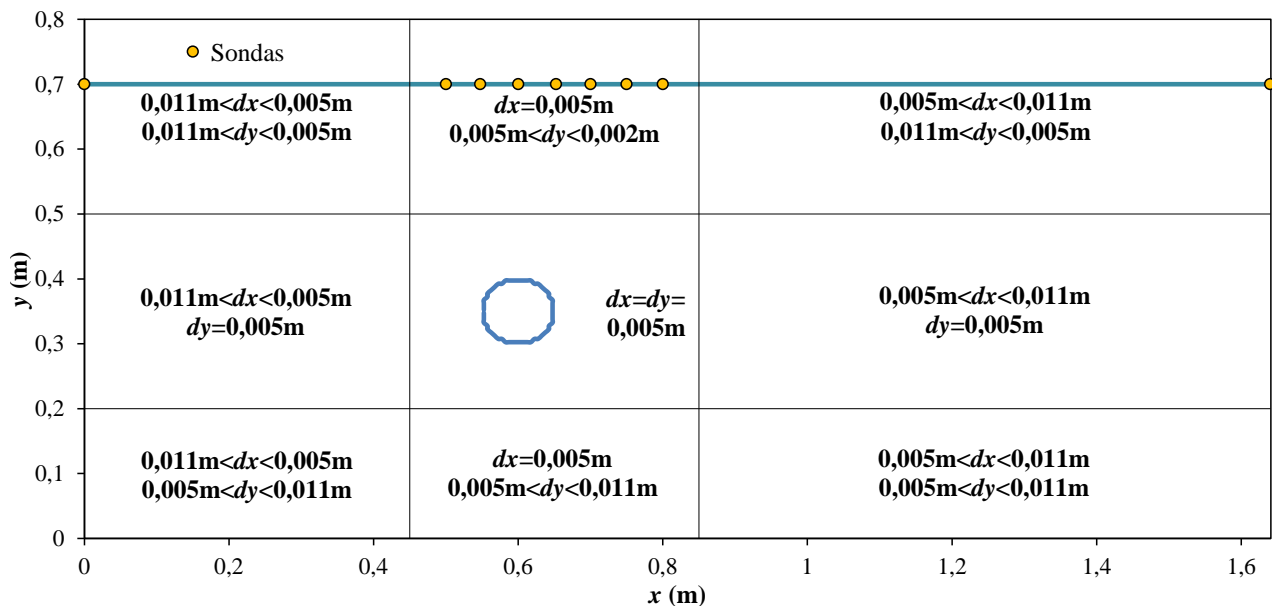


Fig. 4.3 - Características da malha computacional grosseira.

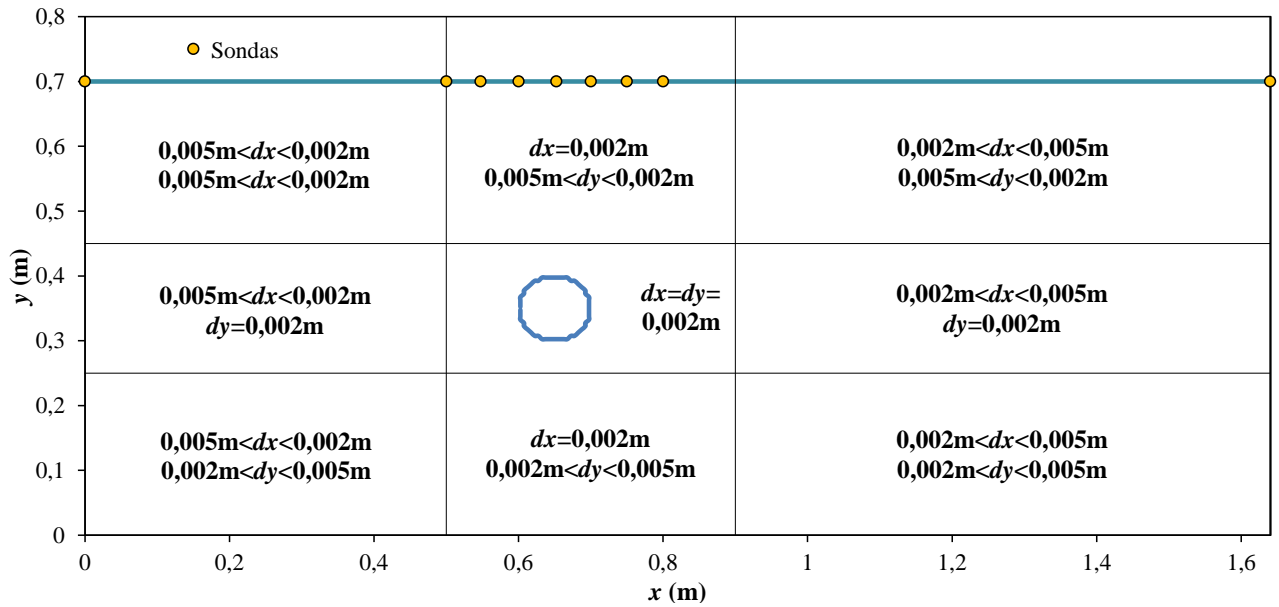


Fig. 4.4 - Características da malha computacional fina.

4.7 Casos simulados

Resumindo, para este estudo, foram simulados os seguintes casos:

- Corrente uniforme com $u=0,002$ m/s ($Re=200$);
- Corrente uniforme com $u=0,01$ m/s ($Re=1000$);
- Onda regular com $H=0,01$ m e $T=130$ s;
- Onda regular com $H=0,01$ m e $T=90$ s;
- Onda regular com $H=0,01$ m e $T=60$ s;
- Onda regular com $H=0,01$ m e $T=20$ s;
- Onda regular com $H=0,01$ m, $T=20$ s e corrente uniforme com $u=0,01$ m/s;
- Onda regular com $H=0,01$ m, $T=130$ s e corrente uniforme com $u=0,01$ m/s;

Os casos simulados encontram-se descritos no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 - Identificação das simulações efectuadas.

Casos	Malha	ID	u (m/s)	H (m)	T (s)
$Re=200$	Grosseira	C1	0,002	-	-
	Fina	C2		-	-
$Re=1000$	Grosseira	C3	0,01	-	-
	Fina	C4		-	-
$Re=1000$ e $KC=24,3$	Grosseira	C5	0,01	0,01	130
$KC=3,7$	Grosseira	C6	-	0,01	20
$KC=11,2$	Grosseira	C7	-	0,01	60
$KC=16,8$	Grosseira	C8	-	0,01	90
$KC=24,3$	Grosseira	C9	-	0,01	130
	Fina	C10	-	0,01	130

As corridas $Re=200$, $Re=1000$ e $KC=24,3$ foram executadas com duas malhas a fim de analisar a influência da discretização da malha nos resultados. As restantes foram realizadas apenas com a malha grosseira devido ao seu menor tempo de cálculo.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações do escoamento em torno do emissário submarino, simulado como um cilindro no modelo, para condições em regime estacionário, oscilatório e combinado (ondas e correntes). Estes resultados foram obtidos com recurso à ferramenta MATLAB, cujo código fonte se encontra definido no Anexo C.

5.1 Regime estacionário

5.1.1 Análise de sensibilidade dos resultados com a resolução das malhas

De modo a fazer uma análise de sensibilidade dos resultados das forças no emissário com o refinamento da malha, procedeu-se a uma análise comparativa dos resultados obtidos com duas malhas de resolução diferente, aqui designadas por malha grosseira, MG, e malha fina, MF.

A análise é realizada para escoamentos caracterizados por dois valores de Reynolds, $Re=200$ e $Re=1000$, e são efectuadas as seguintes comparações de resultados dos casos:

- MG (C1) vs MF (C2) (corrente uniforme, $Re=200$);
- MG (C3) vs MF (C4) (corrente uniforme, $Re=1000$);

Os resultados obtidos para $Re=200$, no que respeita às forças médias horizontais, F_X , e verticais, F_Y , no cilindro e aos respectivos valores médios quadráticos, $F_{X\ RMS}$ e $F_{Y\ RMS}$, aos coeficientes médios de arrasto e sustentação, C_D e C_L , e ainda aos respectivos valores médios quadráticos, $C_{D\ RMS}$ e $C_{L\ RMS}$, são apresentados no Quadro 5.1. No Quadro 5.2 apresentam-se os valores da frequência de desprendimento de vórtices, f_v e do respectivo período, T_v , bem como o número de Strouhal, St .

Quadro 5.1 – Forças horizontais e verticais, coeficientes de arrasto e sustentação e respectivos *rms* para os casos de malha grosseira e fina; $Re=200$.

Corrida	F_X (N)	F_Y (N)	$F_{X\ RMS}$ (N)	$F_{Y\ RMS}$ (N)	C_D	C_L	$C_{D\ RMS}$	$C_{L\ RMS}$
$Re=200$ MG - C1	0,0005	-0,0002	8,00E-06	9,00E-06	2,646	-1,054	41,433	47,234
$Re=200$ MF - C2	0,0004	-0,0004	5,00E-06	7,00E-06	1,919	-2,092	26,766	33,697

Quadro 5.2 - Frequências, períodos de desprendimento de vórtices e número de Strouhal para os casos de malha grosseira e fina; $Re=200$.

Corrida	f_v (Hz)	T_v (s)	St
$Re=200$ MG - C1	0,004	232,13	0,215
$Re=200$ MF - C2	0,004	232,60	0,215

Na Fig. 5.1 apresenta-se a série temporal das velocidades horizontais, u , obtidas na sonda 6 para uma cota $y=0,35470\text{m}$ para as duas malhas.

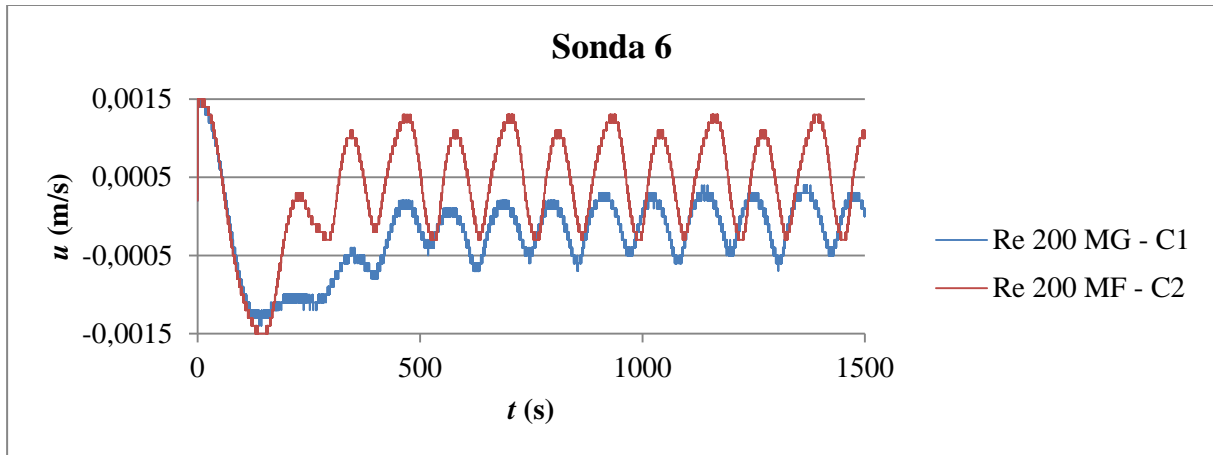


Fig. 5.1 - Velocidades horizontais registadas pela sonda nº6 à cota $y=0,35470\text{m}$, para o período compreendido entre 0 e 1500 segundos; $Re=200$.

Comparando os resultados de ambas as simulações, observa-se uma variação considerável das grandezas referidas e não se verifica qualquer convergência para os valores de referência (Didier, 2012) com o refinamento da malha. É de salientar que o modelo numérico utilizado não está desenvolvido para modelar escoamentos com velocidade tão pequenas, ou seja, com este valor do número de Reynolds. Como se pode ver na Fig. 5.1, verifica-se resultados em “escadas” devido, provavelmente, a um arredondamento por parte do programa como, por exemplo, a velocidade horizontal. No entanto, os valores de f_v , T_v e St são bastante semelhantes.

Os resultados obtidos para $Re=1000$, no que respeita às forças médias horizontais e verticais no cilindro e respectivos valores médios quadráticos, respectivamente F_x e F_y , $F_{x\text{ RMS}}$ e $F_{y\text{ RMS}}$ e dos coeficientes médios de arrasto e sustentação e respectivos valores médios quadráticos, C_D e C_L , $C_{D\text{ RMS}}$ e $C_{L\text{ RMS}}$, são apresentados no Quadro 5.3. No Quadro 5.4 apresentam-se os valores da frequência de desprendimento de vórtices e do respectivo período.

Quadro 5.3 – Forças horizontais, verticais, coeficientes de arrasto, sustentação e respectivos *rms* para caso de malha grosseira e fina; $Re=1000$.

Corrida	F_X (N)	F_Y (N)	$F_{X\,RMS}$ (N)	$F_{Y\,RMS}$ (N)	C_D	C_L	$C_{D\,RMS}$	$C_{L\,RMS}$
$Re=1000$ MG - C3	0,0085	-0,0003	1,30E-05	9,00E-06	1,696	-0,058	2,513	1,793
$Re=1000$ MF - C4	0,0091	-0,0203	1,10E-05	1,00E-05	1,821	-0,405	2,127	1,912

Quadro 5.4 - Frequências, períodos de desprendimento de vórtices e número de Strouhal para caso de malha grosseira e fina; $Re=1000$.

Corrida	F_V (Hz)	T_V (s)	St
$Re=1000$ MG - C3	0,0236	42,37	0,236
$Re=1000$ MF - C4	0,0250	40,06	0,250

Na Fig. 5.2 apresenta-se a série temporal da velocidade horizontal, u , medidos na sonda 6 a uma profundidade $y=0,35470m$, para o tempo entre 0 a 500 segundos.

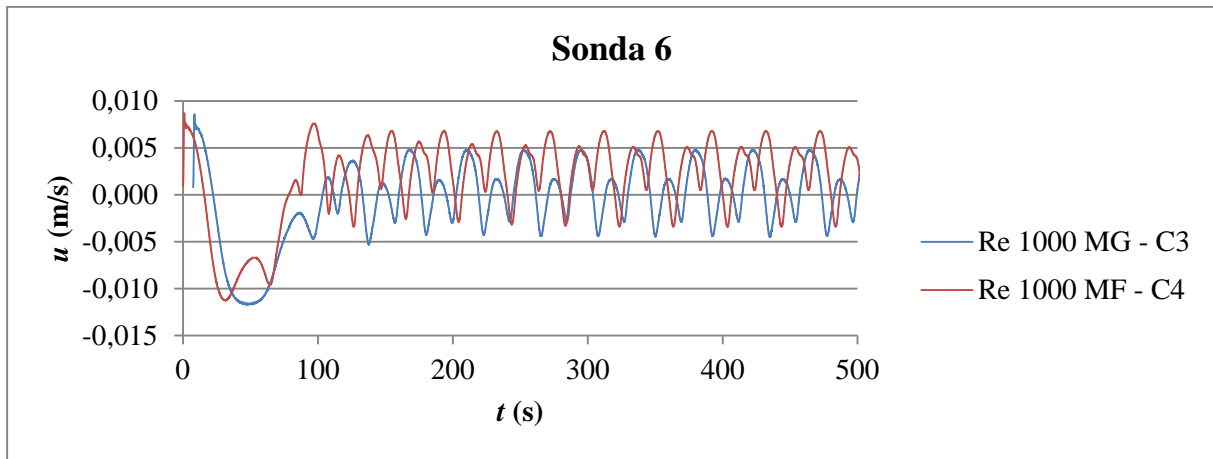


Fig. 5.2 - Velocidades horizontais registadas pela sonda 6 à profundidade $y=0,35470m$, para o tempo entre 0 e 500 segundos; $Re=1000$.

Ao contrário do caso anterior ($Re=200$), para o caso de $Re=1000$, comparando os resultados das simulações 3 e 4, constata-se que os valores são semelhantes para os dois refinamentos de malha testados.

Sumariamente, podem ser retiradas as seguintes conclusões para este caso:

- F_X aumenta com o refinamento da malha (C3 para a C4) e F_Y diminui;
- Os valores de $F_{X\,RMS}$ e $F_{Y\,RMS}$ são bastante pequenos, tal com o esperado;
- C_D aumenta e C_L diminui com o refinamento da malha;
- Os valores de $C_{D\,RMS}$ e $C_{L\,RMS}$ são maiores que o esperado (ver ponto 5.1.2);

- A frequência do desprendimento de vórtices é similar, bem como o número de Strouhal.

5.1.2 Comparação com os resultados do modelo FLUENT

FLUENT é um modelo numérico comercial que utiliza o método dos volumes finitos para resolver as equações de Navier-Stokes. Este modelo, já anteriormente validado (Parxotomo, 2011) é usado como base de comparação dos resultados do IH-2VOF para os casos de $Re=200$ e $Re=1000$ (Didier, 2012).

No Quadro 5.5 e Quadro 5.6 encontram-se os resultados obtidos para $Re=200$ com o modelo FLUENT para dois bloqueios distintos, de 0% e 14% (Didier, 2012) e com o IH-2VOF. Neste último, espera-se um bloqueio superior a 14%, já que sendo, de modo aproximado, o bloqueio definido por:

$$\text{Bloqueio} = \frac{D}{h} \times 100\% \quad (5.1)$$

onde D é o diâmetro do cilindro e h a secção útil para o escoamento, sendo que no presente caso o valor do bloqueio seria de 14%. No entanto, como se verifica a existência de camada limite no fundo do canal, a altura h diminui, aumentando o bloqueio para um valor próximo dos 17%.

Quadro 5.5 – Forças horizontais e verticais, coeficientes de arrasto e sustentação e respectivos *rms* – comparação dos resultados do FLUENT com IH-2VOF; $Re=200$.

Corrida	F_X (N)	F_Y (N)	$F_{X\,RMS}$ (N)	$F_{Y\,RMS}$ (N)	C_D	C_L	$C_{D\,RMS}$	$C_{L\,RMS}$
FLUENT - Bloqueio ~0%	0,0003	0	7,83E-06	1,13E-04	1,310	0,0	0,035	0,468
FLUENT - Bloqueio 14%	0,0003	0	7,83E-06	1,13E-04	1,513	0,0	0,039	0,566
IH-2VOF (Re 200 MG - C1)	0,0005	-0,0002	8,00E-06	9,00E-06	2,646	-1,054	41,433	47,234
IH-2VOF (Re 200 MF - C2)	0,0004	-0,0004	5,00E-06	7,00E-06	1,919	-2,092	26,766	33,697

Quadro 5.6 - Valores das frequências, f_v , períodos de desprendimento de vórtices, T_v , e número de Strouhal obtidos com o FLUENT e com o IH-2VOF; $Re=200$.

Corrida	f_v (Hz)	T_v (s)	St
FLUENT - Bloqueio ~0%	0,0043	235,00	0,194
FLUENT - Bloqueio 14%	0,0043	235,00	0,213
IH-2VOF (Re 200 MG - C1)	0,0043	232,13	0,215
IH-2VOF (Re 200 MF - C2)	0,0043	232,60	0,215

Na Fig. 5.3 apresenta-se a comparação entre os valores calculados com o modelo FLUENT e IH-2VOF de F_x , F_y , F_{xRMS} e F_{yRMS} e na Fig. 5.4 a comparação de C_D , C_L , C_{DRMS} e C_{LRMS} .

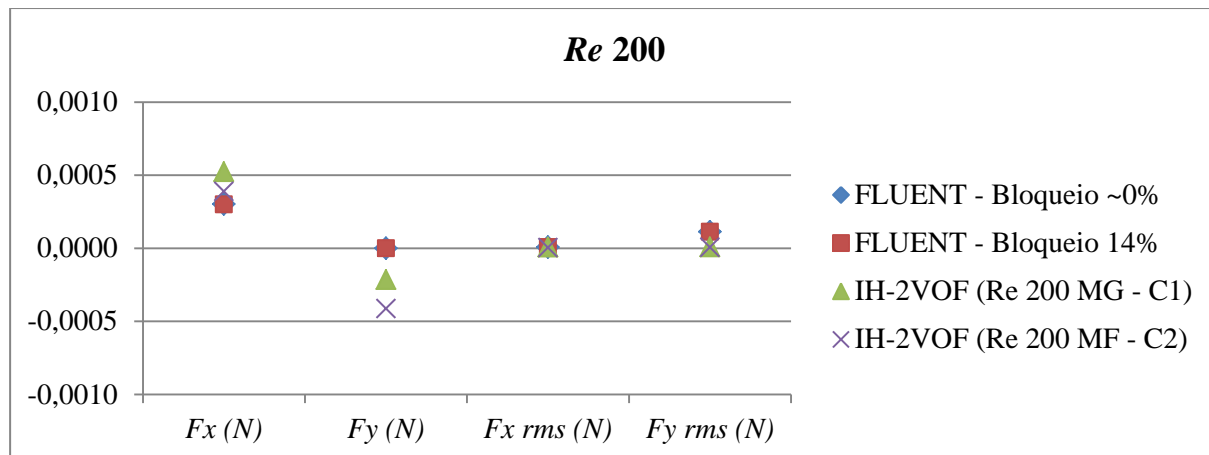


Fig. 5.3 - Forças horizontais, verticais e respectivos rms – comparação dos resultados do FLUENT com IH-2VOF; $Re=200$.

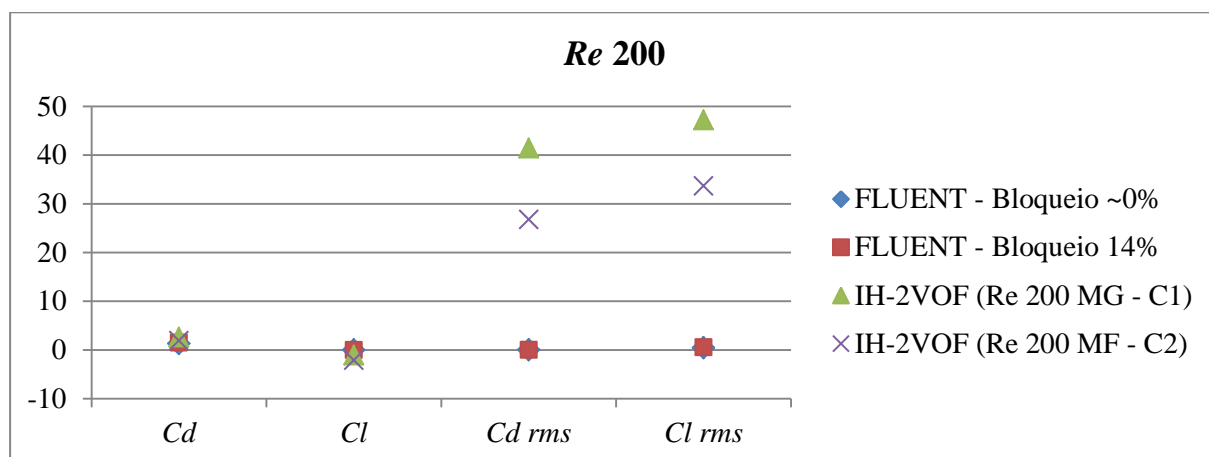


Fig. 5.4 - Coeficientes de arrasto, sustentação e respectivos rms – comparação dos resultados do FLUENT com IH-2VOF; $Re=200$.

A comparação dos resultados de C1 (malha grosseira) e C2 (malha fina), para $Re=200$, efectuada no ponto 5.1, permitiu concluir que, para F_x e F_{xRMS} , os valores que mais se aproximam dos resultados do FLUENT são os de C2, sendo que para F_y não se nota uma grande diferença, já que todos tendem para zero. Quanto ao C_D , verifica-se que C2 produz o valor mais próximo do obtido no FLUENT, não obstante o C_{DRMS} ser quatro ordens de grandeza superior (passando-se o mesmo com o C_{LRMS}). No que diz respeito ao C_L , tanto C1 como C2 divergem do valor zero calculado com o FLUENT, sendo que o valor mais afastado é o de C2.

Comparando as frequências de desprendimento e o Número de Strouhal, verifica-se, no entanto, que os valores obtidos com os dois modelos são próximos, apesar de superiores no modelo IH-2VOF, sendo que o período de desprendimento de C2 está mais próximo dos calculados pelo FLUENT. É de salientar ainda que a frequência de desprendimento de C1, obtida através da série temporal do C_L , foi obtida com recurso a um filtro, uma vez que o sinal da correspondente série do coeficiente de sustentação apresentava um ruído elevado, tornando impossível a obtenção de valores coerentes através de uma simples análise espectral.

Estas discrepâncias nos resultados podem ser devidas a diversos factores. O primeiro deles prende-se com o cálculo das forças, visto o cálculo no FLUENT considerar a soma da força devida à pressão e à viscosidade enquanto no IH-2VOF apenas se considera a força devida à pressão, sendo que, para o caso de $Re=200$, o valor devido à componente da viscosidade não é negligenciável. Outro factor tem a ver com a já referida discretização do cilindro, uma vez que tanto as malhas de C1 como de C2 não possuem um refinamento suficiente para gerar resultados independentemente da resolução da malha, enquanto que o modelo FLUENT possui um refinamento suficiente.

Para o caso de $Re=1000$, os resultados obtidos pelos modelos FLUENT e IH-2VOF são apresentados no Quadro 5.7 e Quadro 5.8.

Quadro 5.7 – Forças horizontais, verticais, coeficientes de arrasto, sustentação e respectivos rms – comparação dos resultados do FLUENT com IH-2VOF; $Re=1000$.

Corrida	F_X (N)	F_Y (N)	$F_{X\,RMS}$ (N)	$F_{Y\,RMS}$ (N)	C_D	C_L	$C_{D\,RMS}$	$C_{L\,RMS}$
FLUENT, Bloqueio 14%	0,0083	0,0000	9,31E-04	5,79E-03	1,669	0,000	0,186	1,157
IH-2VOF (Re 1000 MG – C3)	0,0085	-0,0003	1,30E-05	9,00E-06	1,696	-0,058	2,513	1,793
IH-2VOF (Re 1000 MF – C4)	0,0091	-0,0203	1,10E-05	1,00E-05	1,821	-0,405	2,127	1,912

Quadro 5.8 - Frequências, períodos de desprendimento de vórtices e número de Strouhal – comparação dos resultados do FLUENT com IH-2VOF; $Re=1000$.

Corrida	F_V (Hz)	T_V (s)	St
FLUENT, Bloqueio 14%	0,0251	39,79	0,251
IH-2VOF (Re 1000 MG – C3)	0,0236	42,37	0,236
IH-2VOF (Re 1000 MF – C4)	0,0250	40,06	0,250

Na Fig. 5.5 apresenta-se a comparação entre os valores calculados com os modelos FLUENT e IH-2VOF de F_X , F_Y , $F_{X\,RMS}$ e $F_{Y\,RMS}$ e na Fig. 5.6 a comparação de C_D , C_L , $C_{D\,RMS}$ e $C_{L\,RMS}$.

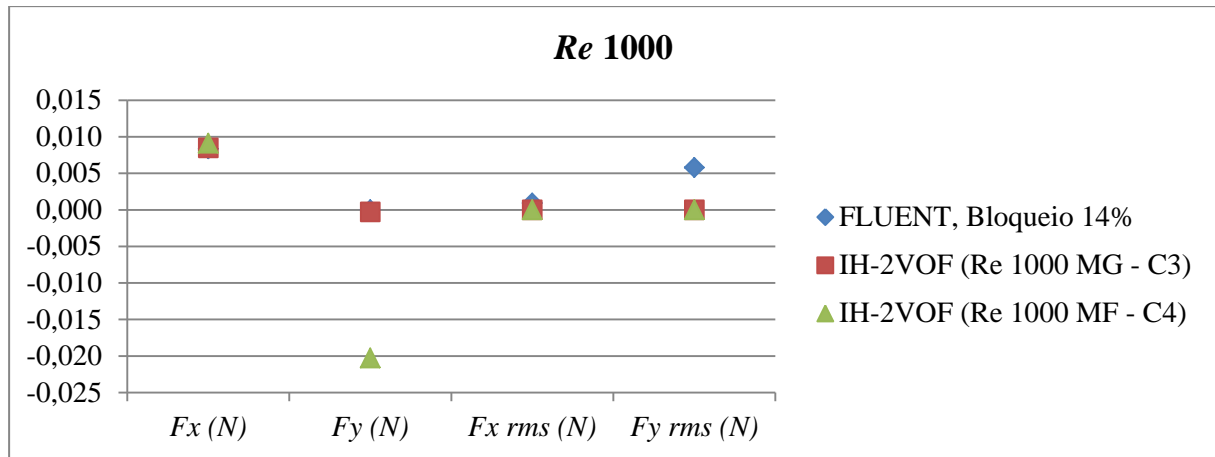


Fig. 5.5 - Forças horizontais, verticais e seus rms – comparação dos resultados do FLUENT com IH-2VOF; $Re=1000$.

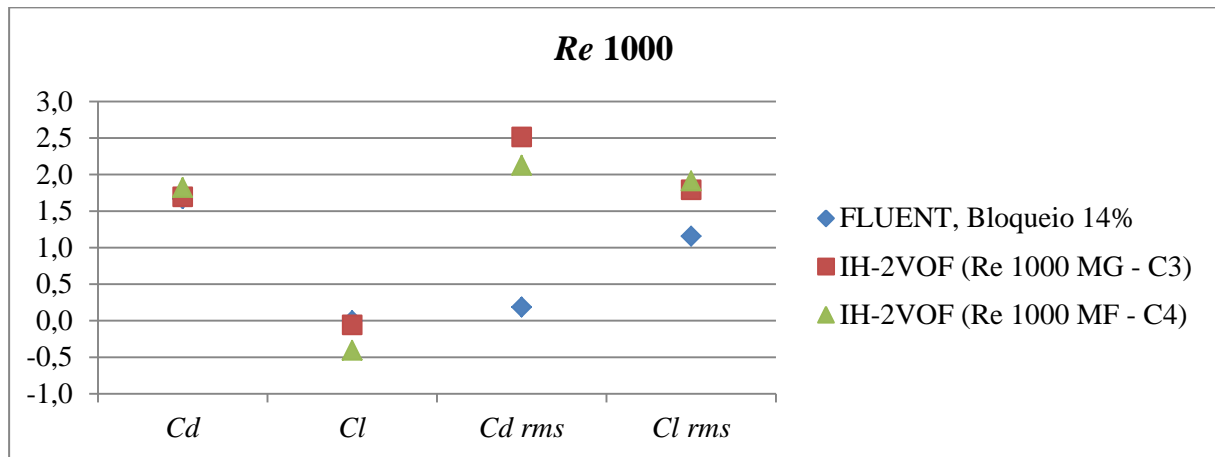


Fig. 5.6 - Coeficientes de arrasto, sustentação e seus rms – comparação dos resultados do FLUENT com IH-2VOF; $Re=1000$.

Analisando os resultados de C3 (malha grosseira) e C4 (malha fina) e comparando-os com os do modelo FLUENT, observa-se que estes estão francamente mais próximos entre si que no caso anterior de $Re=200$. No entanto, continua a não se obter uma convergência dos resultados com o refinamento da malha, sendo que tal pode ser facilmente evidenciado pelo facto de alguns valores serem mais próximos numa corrida do que noutra.

As forças horizontais, F_x , obtidas com o modelo IH-2VOF aproximam-se dos resultados calculados com o FLUENT, apesar de serem superiores e não terem em conta a componente de viscosidade. As forças verticais, F_y , são menores nas presentes simulações, podendo esta diferença ser explicada também pela ausência dessa mesma componente de viscosidade. O coeficiente de arrasto de C3 está mais próximo do valor do FLUENT apesar da discretização desta corrida ser mais grosseira.

De notar ainda que os valores de $C_{D\ RMS}$ são maiores no IH-2VOF para os casos em estudo, o que é explicado pelo elevado ruído do espectro do mesmo. Quanto ao coeficiente de sustentação, os valores obtidos com o IH-2VOF também estão próximos dos valores do FLUENT, tal como o seu valor médio quadrático.

Por fim, a frequência de desprendimento aproxima-se da obtida pelo FLUENT, notando-se uma aparente convergência nestes valores com o refinamento da malha – quanto mais refinada a malha mais próximos são os mesmos.

Nas Fig. 5.7 e Fig. 5.8 apresenta-se a variação das forças horizontais e verticais com o número de Reynolds.

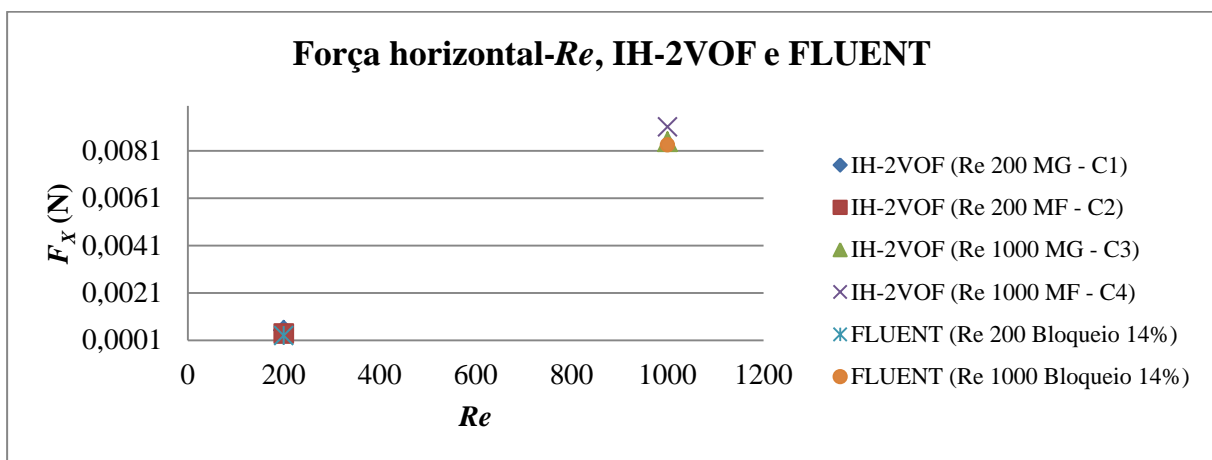


Fig. 5.7 - Variação das forças horizontais com Re ; IH-2VOF e FLUENT.

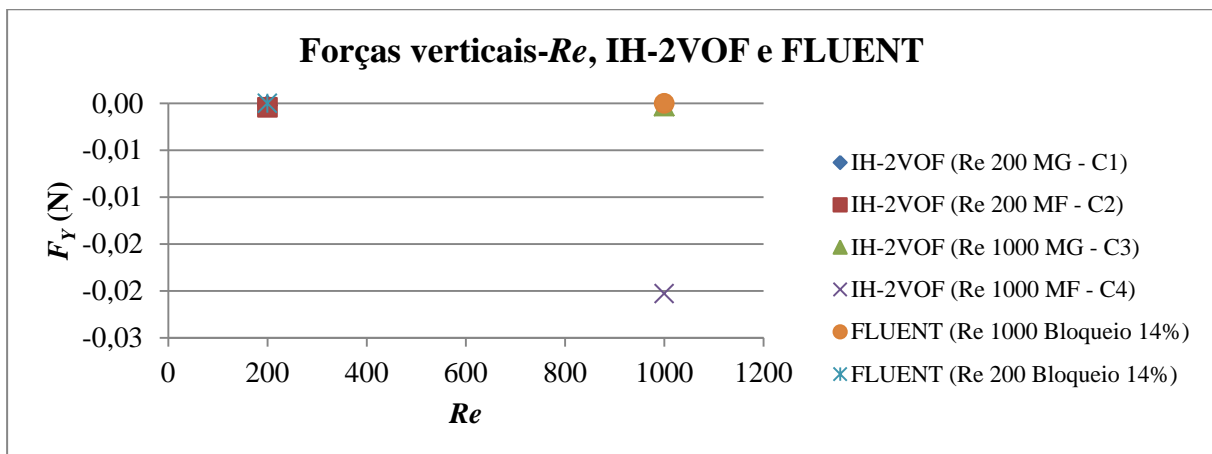


Fig. 5.8 - Variação das forças verticais com Re ; IH-2VOF e FLUENT.

Das Fig. 5.7 e Fig. 5.8 pode-se concluir que a força horizontal aumenta de $Re=200$ para $Re=1000$, conforme esperado, tal como a força vertical. Verifica-se ainda que os resultados dos modelos

são bastante semelhantes para o caso de $Re=1000$ e malha grosseira. Para $Re=200$, os resultados de F_x são mais próximos dos do FLUENT para malha fina enquanto os de F_y são mais próximos para a malha grosseira. Tal pode dever-se à insuficiente discretização do contorno do cilindro, uma vez que, apesar da malha fina possuir uma maior discretização do contorno, esta continua a não ser suficientemente refinada de modo a produzir resultados convergentes.

Nas Fig. 5.9e Fig. 5.10 apresenta-se a variação do coeficiente de arrasto e de sustentação com o número de Reynolds.

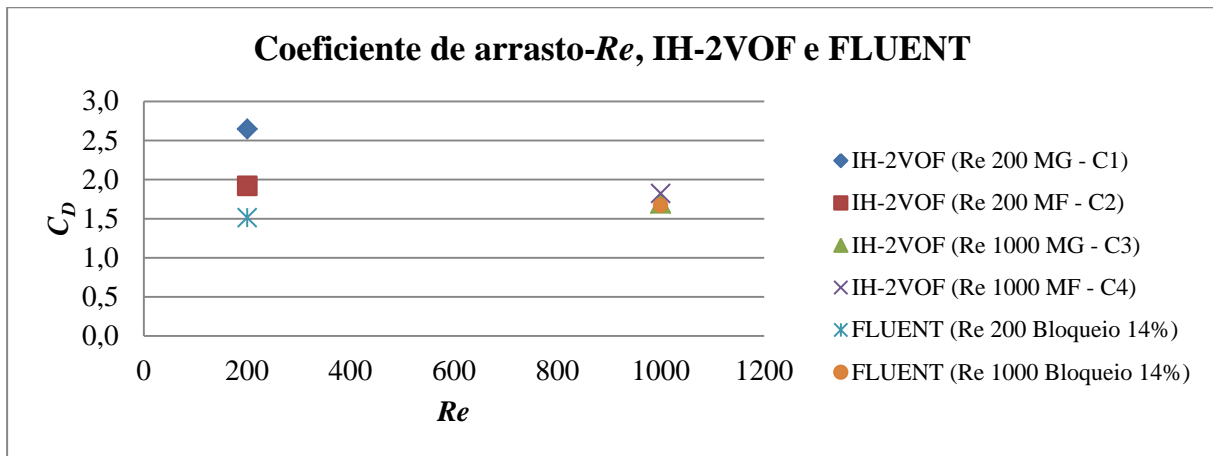


Fig. 5.9 - Variação do coeficiente de arrasto com Re ; IH-2VOF e FLUENT.

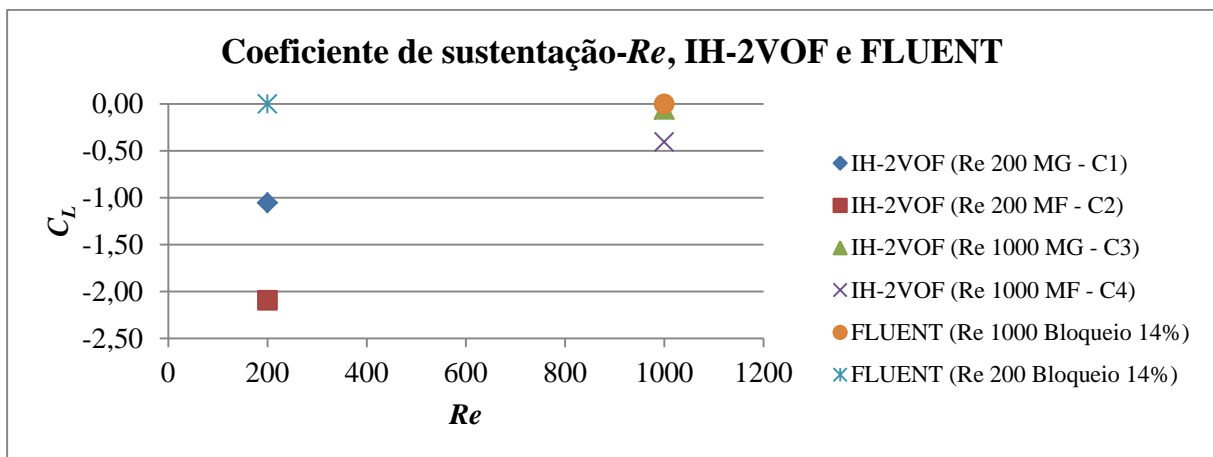


Fig. 5.10 - Variação do coeficiente de sustentação com Re ; IH-2VOF e FLUENT.

Das Fig. 5.9e Fig. 5.10 conclui-se que os valores do coeficiente de arrasto calculados com o FLUENT aumentam de $Re=200$ para $Re=1000$, mas os calculados com o IH-2VOF diminuem. Quanto

ao coeficiente de sustentação, este é nulo quando calculado com o FLUENT e, quando calculado com o IH-2VOF, aumenta, tanto no caso de malhas grosseiras como nas finas.

Nas Fig. 5.11 e Fig. 5.12 apresenta-se a variação do período de desprendimento e do número de Strouhal com o número de Reynolds.

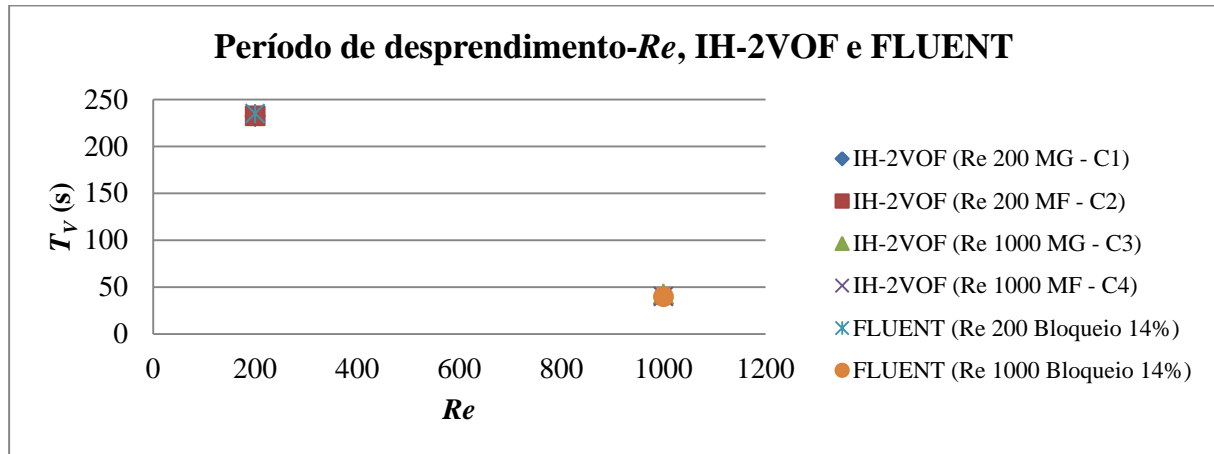


Fig. 5.11 - Variação do período de desprendimento com Re ; IH-2VOF e FLUENT.

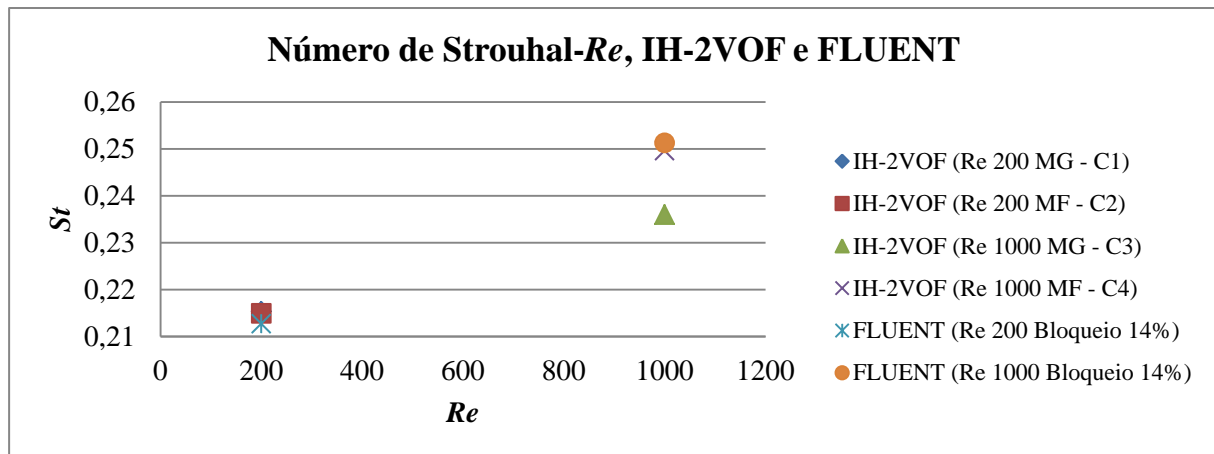


Fig. 5.12 - Variação do número de Strouhal com Re ; IH-2VOF e FLUENT.

Das Fig. 5.11 e Fig. 5.12 conclui-se que o período de desprendimento decresce com o aumento do número de Reynolds, tanto para o IH-2VOF como para o FLUENT e que os valores obtidos com o modelo IH-2VOF e malha fina são mais próximos dos obtidos com o FLUENT. Quanto ao número de Strouhal, este apresenta, como seria de esperar, a tendência inversa visto depender da frequência de desprendimento ou seja, aumenta de $Re=200$ para $Re=1000$ em ambos os modelos.

5.2 Regime oscilatório

5.2.1 Análise de sensibilidade dos resultados com a resolução das malhas

Efectua-se neste ponto uma análise à sensibilidade dos resultados das forças no emissário com o refinamento das malhas, Corridas 9 e 10: onda regular com $H=0,01\text{m}$ e $T=130\text{s}$. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 5.9 e Quadro 5.10.

Quadro 5.9 – Forças horizontais e verticais, coeficientes de arrasto e sustentação e respectivos *rms* para caso de malha grosseira e fina; $H=0,01\text{m}$, $T=130\text{s}$.

Corrida	F_X (N)	F_Y (N)	$F_{X\text{RMS}}$ (N)	$F_{Y\text{RMS}}$ (N)	C_D	C_L	$C_{D\text{RMS}}$	$C_{L\text{RMS}}$
$T=130\text{s}$ MG (C9)	0,0042	-0,0013	2,20E-05	1,60E-05	0,240	-0,072	1,262	0,937
$T=130\text{s}$ MF (C10)	0,0043	-0,0035	2,40E-05	1,80E-05	0,243	-0,197	1,376	1,054

Quadro 5.10 - Frequências, períodos de desprendimento de vórtices e número de Strouhal para caso de malha grosseira e fina; $H=0,01\text{m}$, $T=130\text{s}$.

Corrida	F_V (Hz)	T_V (s)	St
$T=130\text{s}$ MG (C9)	0,0350	28,56	0,197
$T=130\text{s}$ MF (C10)	0,0370	27,00	0,198

Na Fig. 5.13 apresenta-se a comparação entre os resultados obtidos com as duas malhas, dos valores calculados de F_X , F_Y , $F_{X\text{RMS}}$ e $F_{Y\text{RMS}}$ e na Fig. 5.14 a comparação de C_D , C_L , $C_{D\text{RMS}}$ e $C_{L\text{RMS}}$.

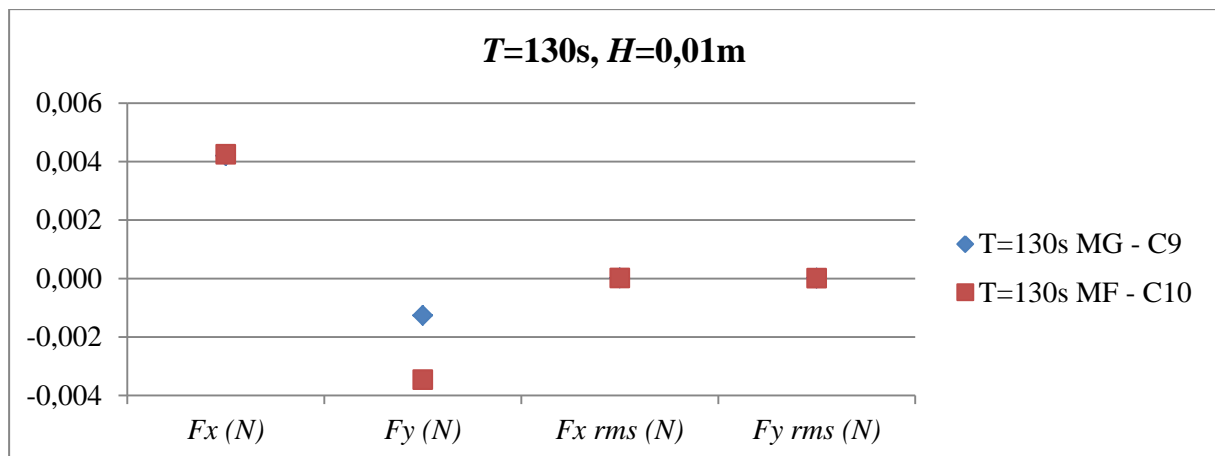


Fig. 5.13 - Forças horizontais, verticais e respectivos *rms* para caso de malha grosseira e fina; $T=130\text{s}$, $H=0,01\text{m}$.

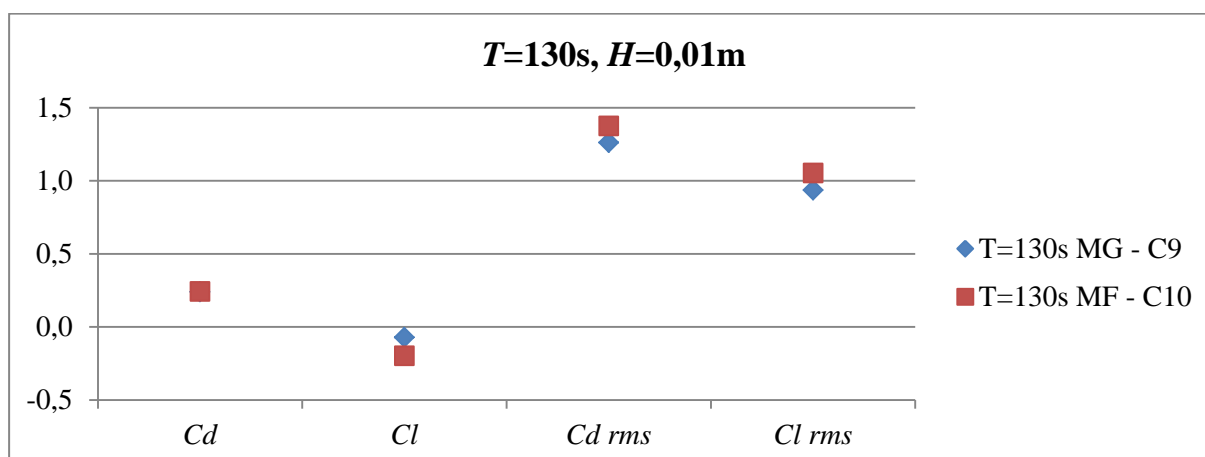


Fig. 5.14 - Coeficientes de arrasto, sustentação e respectivos *rms* para caso de malha grosseira e fina; $T=130s$, $H=0,01m$.

Da comparação dos resultados com diferente discretização da malha, Corridas 9 e 10, podem ser retiradas as seguintes conclusões:

- F_x , F_y , C_D e C_L e respectivos valores quadráticos médios são bastante próximos, um pouco à semelhança do que se verificou entre as Corridas 3 e 4, sendo que a maior diferença se verifica para as forças verticais;
- No que diz respeito à frequência de desprendimento e ao St , estes são um pouco mais elevados no caso da malha fina, C10, sendo o período igual ao inverso da frequência de desprendimento, consequentemente, menor.

Outro aspecto importante para a análise de sensibilidade dos resultados com o refinamento das malhas é o tempo, tanto de cálculo como de análise de resultados. Verifica-se que uma simulação com uma malha grosseira demora, em média, quatro vezes menos que com uma com malha fina, sendo que o padrão se mantém aquando da análise dos respectivos resultados.

Quanto a ganhos de resolução dos resultados com o aumento da discretização, admite-se que um maior número de células no contorno do cilindro (60 células no caso grosseiro e 148 células no caso fino) influencia positivamente os resultados, visto ter-se uma melhor definição da zona de separação (interface entre a camada limite e a esteira da vorticidade). No entanto, para uma correcta discretização do cilindro, este deveria ter, no mínimo, 200 células no contorno (Didier, 2012) e um refinamento na direcção normal à parede do cilindro.

5.2.2 Resultados para diferentes períodos

Neste ponto resumem-se os resultados obtidos para os casos sem corrente e com uma altura de onda, $H=0,01$ m e diferentes períodos da onda: $T=20$ s, $T=60$ s, $T=90$ s e $T=130$ s, respectivamente. No Quadro 5.11 e Quadro 5.12 apresentam-se os resultados obtidos.

Quadro 5.11 – Forças horizontais e verticais, coeficientes de arrasto e sustentação e respectivos rms ; $H=0,01$ m, $T=20$ s, $T=60$ s, $T=90$ s e $T=130$ s.

Corrida	F_X (N)	F_Y (N)	$F_{X\text{RMS}}$ (N)	$F_{Y\text{RMS}}$ (N)	C_D	C_L	$C_{D\text{RMS}}$	$C_{L\text{RMS}}$
T=20s,H=0,01m (C6)	0,0010	0,0005	7,60E-05	1,40E-05	0,058	0,030	4,371	0,793
T=60s,H=0,01m (C7)	0,0013	-0,0011	3,00E-05	1,90E-05	0,074	-0,065	1,713	1,107
T=90s,H=0,01m (C8)	0,0042	-0,0015	2,50E-05	1,60E-05	0,238	-0,083	1,401	0,934
T=130s,H=0,01m (C9)	0,0042	-0,0016	2,20E-05	1,60E-05	0,240	-0,072	1,262	0,927

Quadro 5.12 - Frequências, períodos de desprendimento de vórtices e número de Strouhal; $H=0,01$ m, $T=20$ s, $T=60$ s, $T=90$ s e $T=130$ s.

Corrida	F_V (Hz)	T_V (s)	St
T=20s,H=0,01m (C6)	-	-	-
T=60s,H=0,01m (C7)	0,0492	20,34	0,263
T=90s,H=0,01m (C8)	0,0443	22,56	0,237
T=130s,H=0,01m (C9)	0,0350	28,56	0,197

Na Fig. 5.15 apresenta-se os respectivos valores calculados de F_X , F_Y , $F_{X\text{RMS}}$ e $F_{Y\text{RMS}}$ e na Fig. 5.16 a de C_D , C_L , $C_{D\text{RMS}}$ e $C_{L\text{RMS}}$.

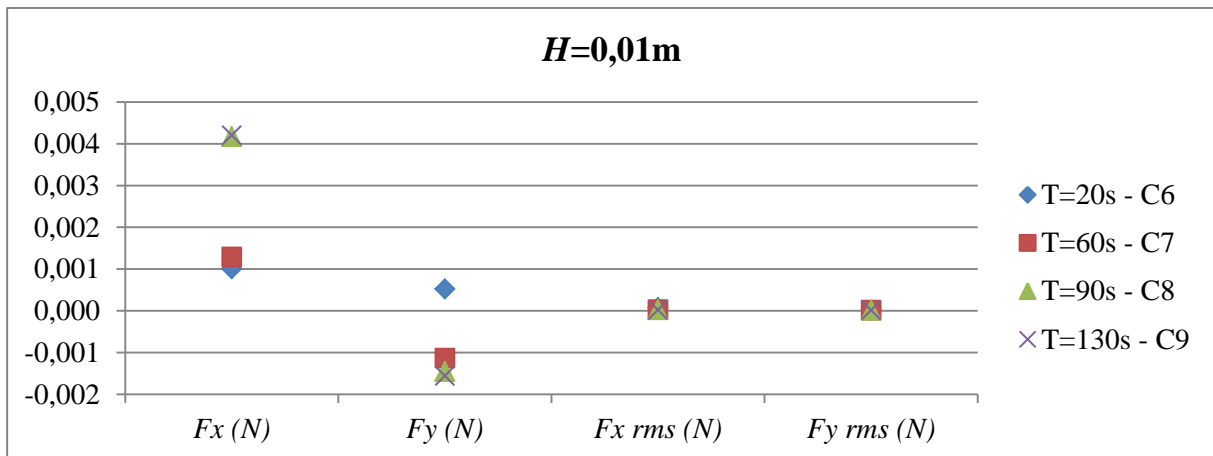
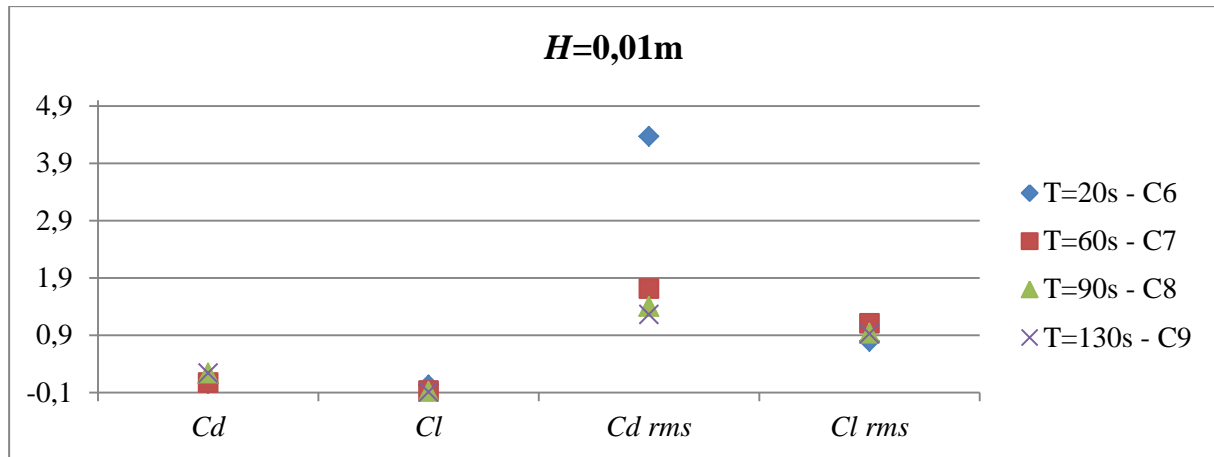
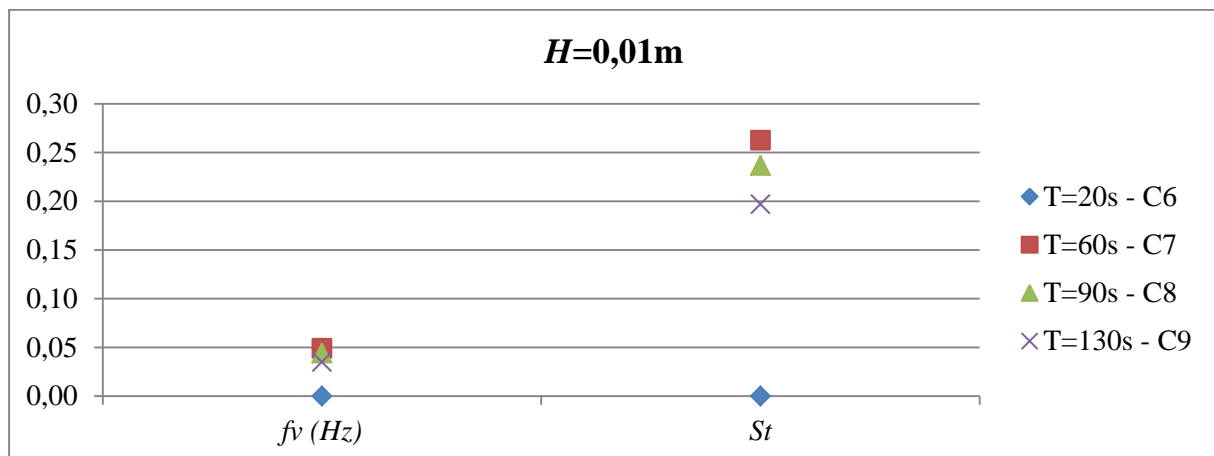


Fig. 5.15 - Forças horizontais, verticais e respectivos rms ; T variável, $H=0,01$ m.

Fig. 5.16 - Coeficientes de arrasto, sustentação e respectivos rms ; T variável, $H=0,01m$.

Na Fig. 5.17 apresenta-se a comparação entre os valores calculados para os diferentes casos das frequências de desprendimento e número de Strouhal.

Fig. 5.17 - Frequências de desprendimento e número de Strouhal; $H=0,01m$.

Dos resultados acima expostos pode-se concluir que, em geral, as forças horizontais aumentam com o período da onda enquanto as forças verticais, e os valores quadráticos médios destas duas grandezas apresentam uma tendência decrescente com o aumento do período da onda.

O coeficiente de arrasto aumenta com o aumento do período da onda enquanto o coeficiente de sustentação diminui. No que diz respeito ao valor quadrático médio do coeficiente de arrasto, este diminui com o aumento do período, enquanto o respectivo valor do coeficiente de sustentação aumenta até ao período de $T=60s$, diminuindo para os restantes períodos.

No que diz respeito à vorticidade, observa-se que, para $T=20s$, não há desprendimento de vórtices sendo que, no espectro de potências do sinal do coeficiente de sustentação, o maior pico

representa a frequência da onda e não a frequência de desprendimento. Este espectro pode ser visto na Fig. 5.18.

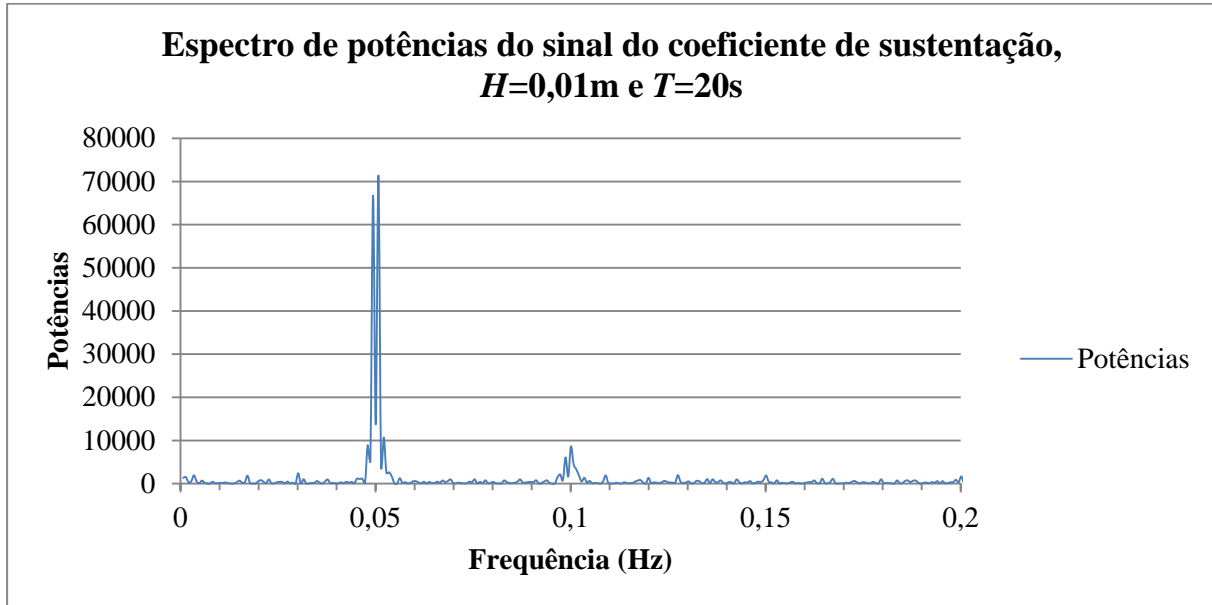
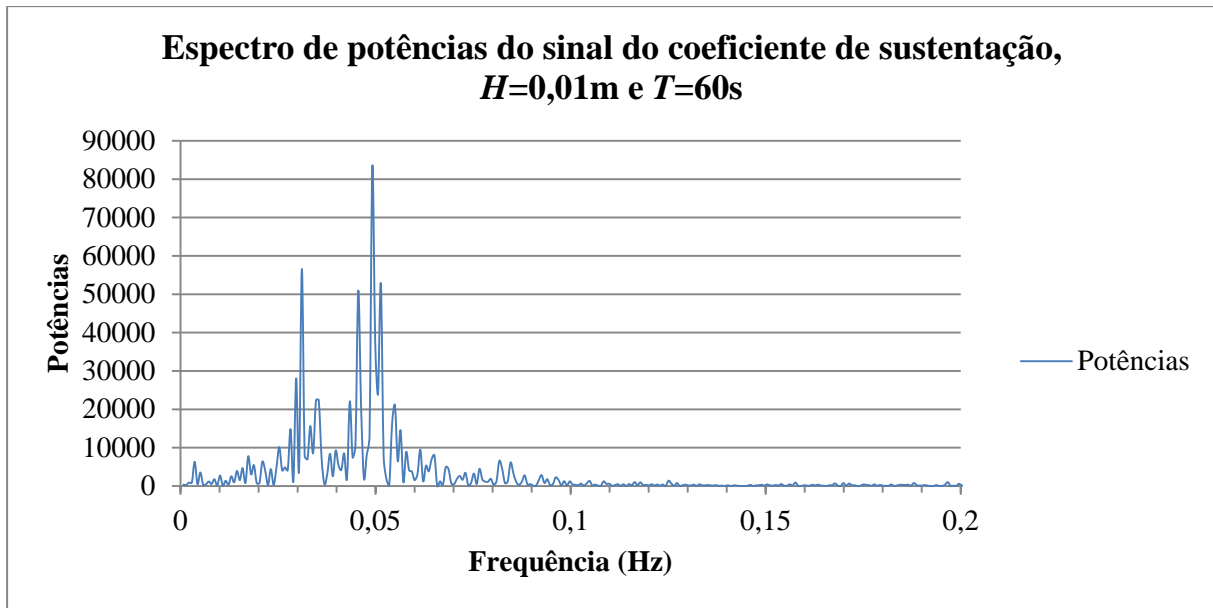
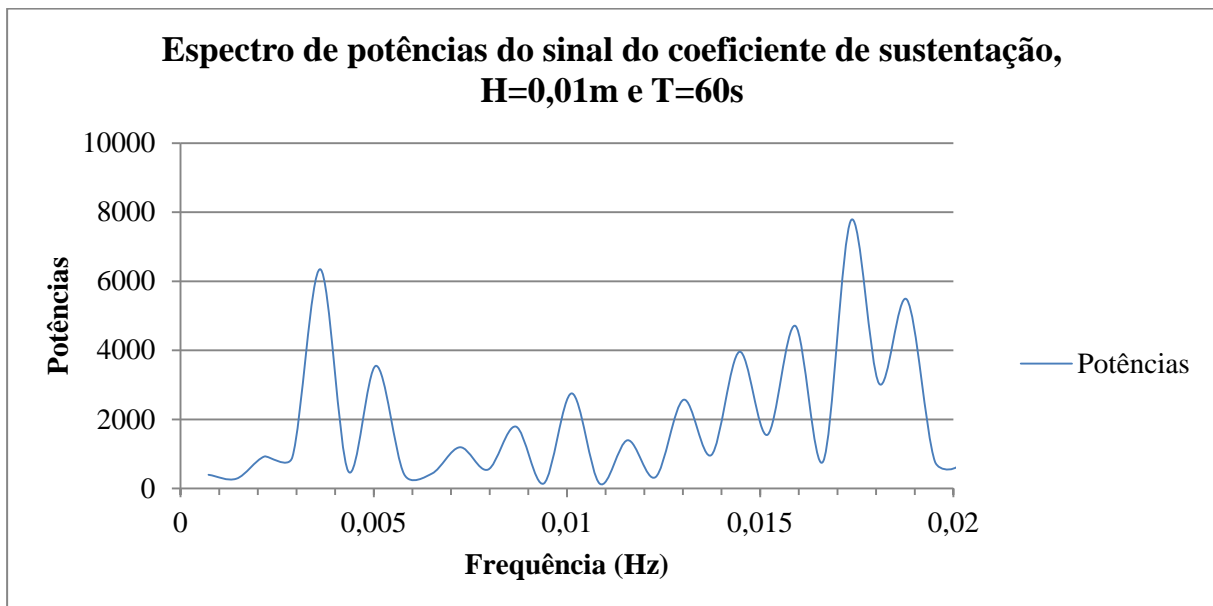
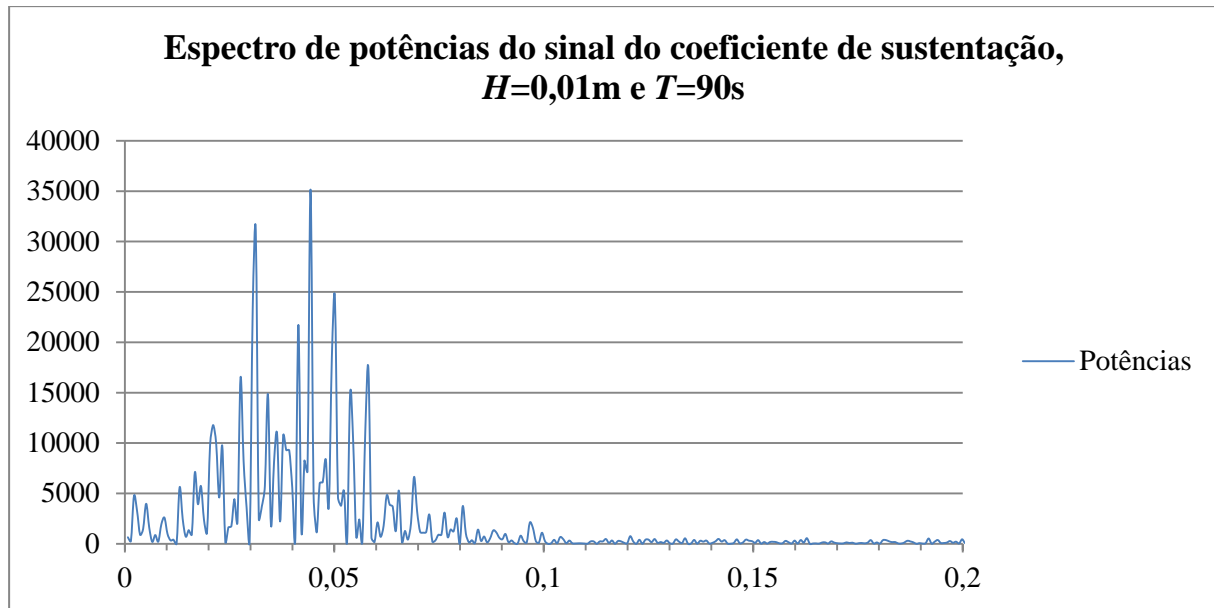
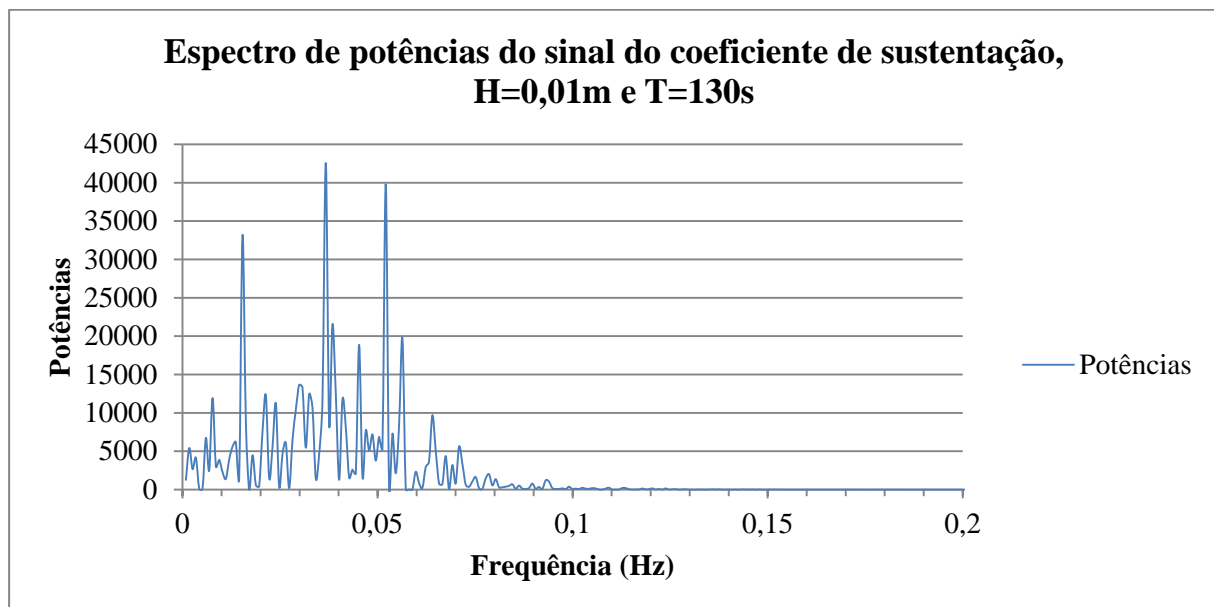


Fig. 5.18 - Espectro de potências do sinal do coeficiente de sustentação, $H=0,01m$ e $T=20s$.

Para os restantes casos observa-se que a frequência de desprendimento vai diminuindo com o aumento do período da onda (e consequente aumento do período de desprendimento), tal como o número de Strouhal. Este resultado é lógico uma vez que, ao haver uma tendência para o desprendimento de vórtices, este é atenuado pelas velocidades horizontais contrárias à direcção da propagação da onda (quando na zona do cilindro se faz sentir o efeito de uma cava de onda).

Nas Fig. 5.19, Fig. 5.21 e Fig. 5.22 podem observar-se os espectros de potências do sinal do coeficiente de sustentação para os casos de $T=60s$, $T=90s$ e $T=130s$. Na Fig. 5.20 apresenta-se o espectro para uma gama de frequências menor, entre 0 Hz e 0,02 Hz, para o caso de $T=60s$.

Fig. 5.19 - Espectro de potências do sinal do coeficiente de sustentação, $H=0,01\text{m}$ e $T=60\text{s}$.Fig. 5.20 - Zoom do espectro de potências do sinal do coeficiente de sustentação, $H=0,01\text{m}$ e $T=60\text{s}$.

Fig. 5.21 - Espectro de potências do sinal do coeficiente de sustentação, $H=0,01m$ e $T=90s$.Fig. 5.22 - Espectro de potências do sinal do coeficiente de sustentação, $H=0,01m$ e $T=130s$.

Da análise destes gráficos pode concluir-se que a frequência com maior energia é a do desprendimento de vórtices, de $0,0492\text{ Hz}$ para o caso de $T=60s$, de $0,0443\text{ Hz}$ para o caso de $T=90s$ e de $0,0425\text{ Hz}$ para o caso de $T=130s$. No entanto, pode ser observada outra frequência relevante nos referidos gráficos: a frequência da onda. Esta frequência é pouco perceptível em alguns casos, por corresponder a picos de frequência inferior à de desprendimento de vórtices, tal como se pode ver na

Fig. 5.20. Nesta figura é possível observar-se um máximo de frequência em 0,017Hz, máximo este correspondente à frequência da onda em questão.

Por fim, pode ainda estabelecer-se um paralelismo entre a variação de F_x , F_y , C_D , C_L , T_v e St com a variação do número de Keulegan-Carpenter, KC . Na Fig. 5.23 e Fig. 5.24 apresenta-se a variação da força horizontal e vertical com o número de Keulegan-Carpenter.

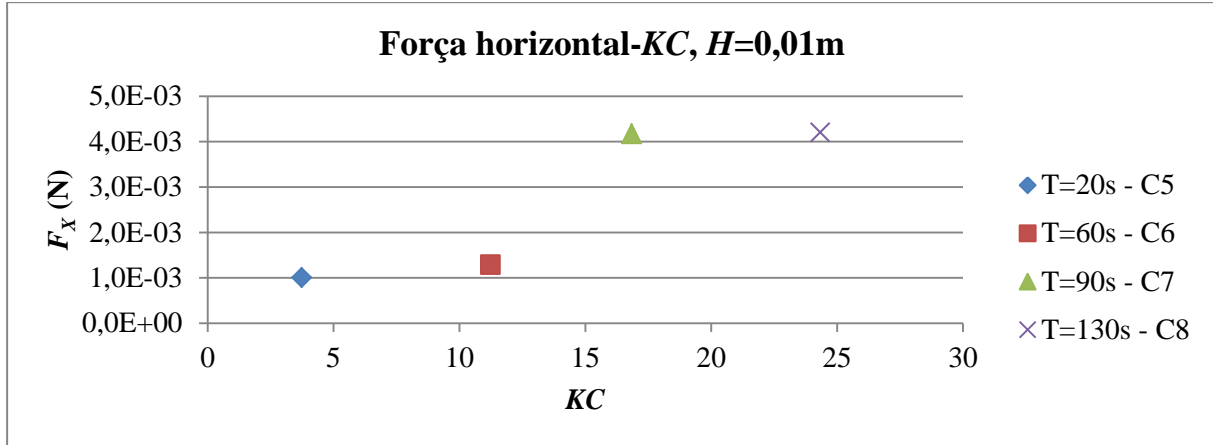


Fig. 5.23 - Variação da força horizontal com KC ; $H=0,01m$.

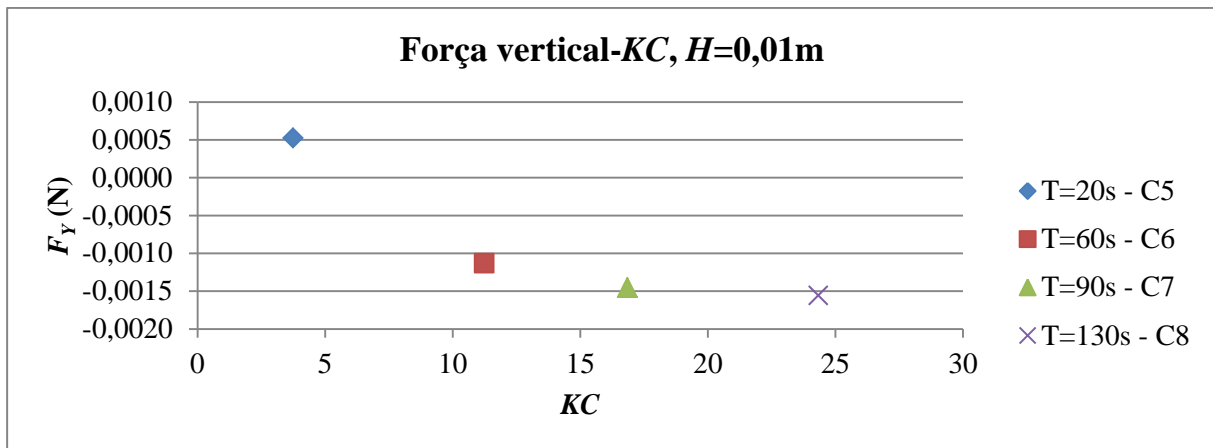
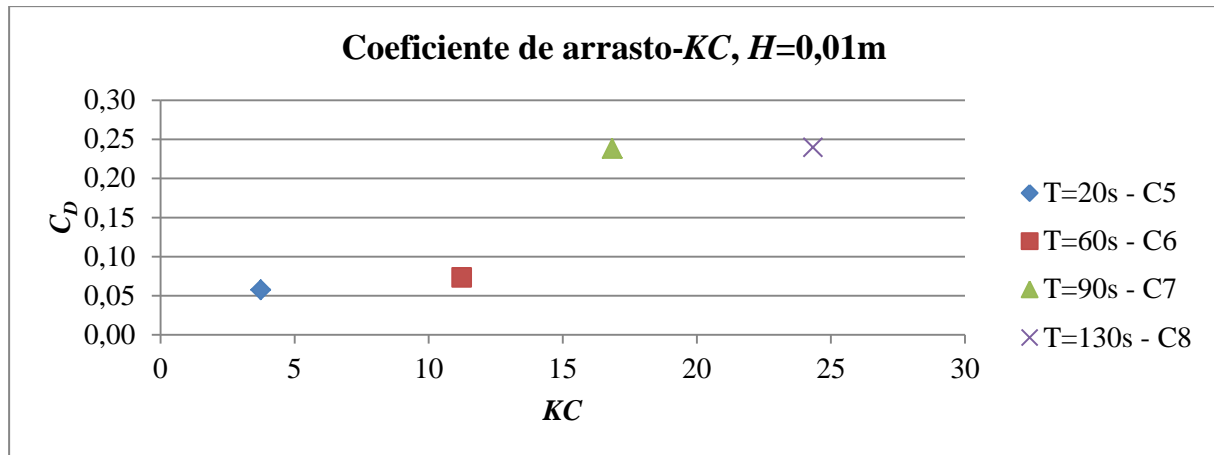
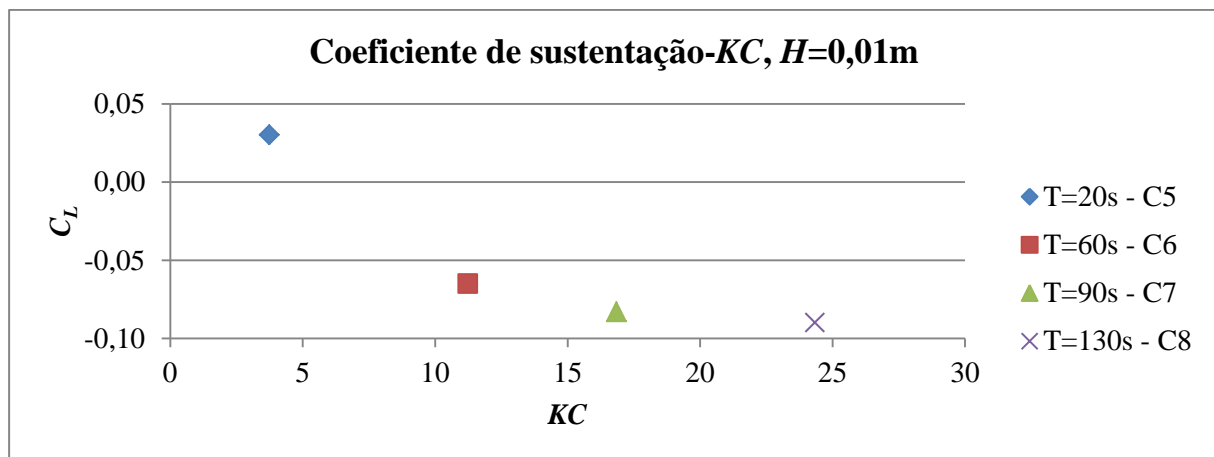


Fig. 5.24 - Variação da força vertical com KC ; $H=0,01m$.

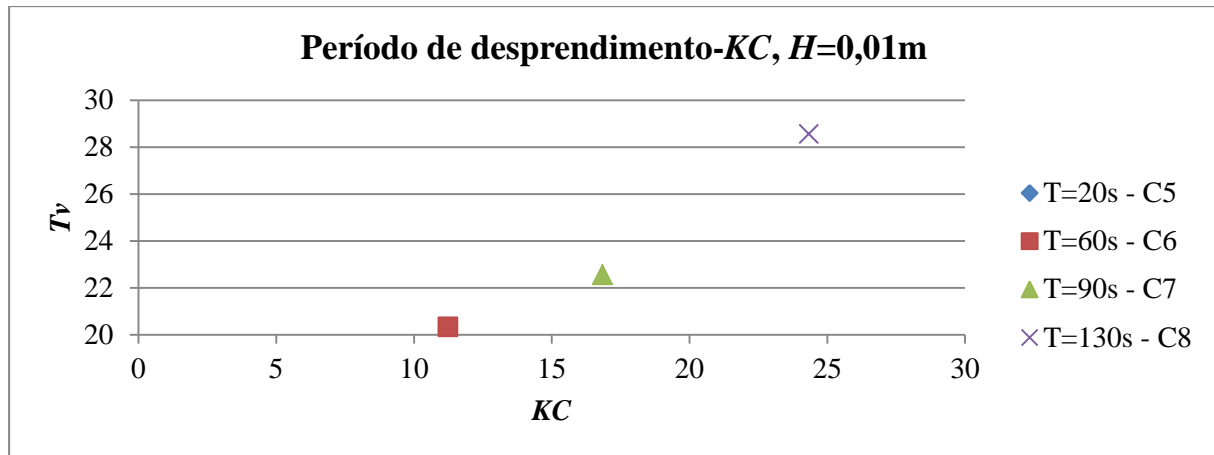
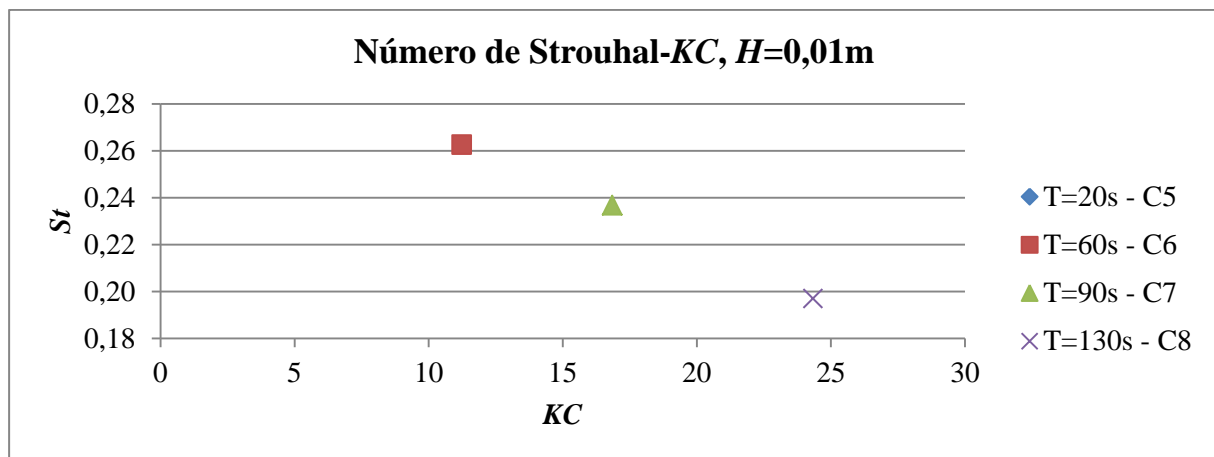
Sendo o número de Keulegan-Carpenter função do período, é de esperar que as grandezas em estudo (forças horizontais e verticais, coeficientes de arrasto e sustentação, frequência, período de desprendimento e número de Strouhal) variem de igual forma. Assim sendo, confirma-se que F_x aumenta com o aumento de KC e que F_y diminui.

Na Fig. 5.25 e Fig. 5.26 apresenta-se a variação dos coeficientes de arrasto e sustentação com KC .

Fig. 5.25 - Variação do coeficiente de arrasto com KC ; $H=0,01m$.Fig. 5.26 - Variação do coeficiente de sustentação com KC ; $H=0,01m$.

Na sequência do exposto no parágrafo anterior, confirma-se novamente que o coeficiente de arrasto aumenta com o aumento de KC enquanto o coeficiente de sustentação diminui.

Na Fig. 5.27 e Fig. 5.28 apresenta-se a variação do período de desprendimento de vórtices e do número de Strouhal com KC .

Fig. 5.27 - Variação do período de desprendimento com KC ; $H=0,01m$.Fig. 5.28 - Variação do número de Strouhal com KC ; $H=0,01m$.

Da análise destas figuras, observa-se que o período de desprendimento aumenta com o valor de KC e o número de Strouhal diminui. Tal faz todo o sentido uma vez que, conforme já referido, quanto mais baixo o período maior a atenuação da formação de vórtices, já que a alteração de sentido das velocidades, aquando de uma mudança de fase da onda, retarda o desprendimento de vórtices. Quando este retardamento atinge um valor limite, deixa de se verificar desprendimento.

5.3 Regime combinado – estacionário e oscilatório

Neste ponto apresentam-se os resultados de um caso simulado com ondas e corrente (Corrida 5). No Quadro 5.13 e Quadro 5.14 apresentam-se os resultados obtidos e a sua comparação com os casos exclusivamente com corrente e exclusivamente com onda, respectivamente, sendo que para o presente caso a velocidade considerada para o cálculo do número de Strouhal terá de englobar a componente estacionária e a velocidade máxima da componente oscilatória e f_V é a frequência média do desprendimento de vórtices (Sumer & Fredsøe, 2006).

Quadro 5.13 – Forças horizontais e verticais, coeficientes de arrasto e sustentação e respectivos rms ; $Re=1000$, $H=0,01m$ e $T=130s$ (C5); $Re=1000$ (C3); $H=0,01m$ e $T=130s$ (C9).

Corrida	F_X (N)	F_Y (N)	$F_{X\,RMS}$ (N)	$F_{Y\,RMS}$ (N)	C_D	C_L	$C_{D\,RMS}$	$C_{L\,RMS}$
Onda e corrente (C5)	0,0086	-0,0005	1,20E-05	1,10E-05	0,209	-0,012	0,290	0,263
Corrente (C3)	0,0085	-0,0003	1,30E-05	9,00E-06	1,696	-0,058	2,513	1,793
Onda (C9)	0,0042	-0,0016	2,20E-05	1,60E-05	0,240	-0,090	1,262	0,937

Quadro 5.14 - Frequências, períodos de desprendimento de vórtices e número de Strouhal; $Re=1000$, $H=0,01m$ e $T=130s$; $Re=1000$; $H=0,01m$ e $T=130s$.

Corrida	f_V (Hz)	T_V (s)	St
Onda e corrente (C5)	0,0235	42,52	0,082
Corrente (C3)	0,0236	42,37	0,236
Onda (C9)	0,0350	28,56	0,197

Na figura Fig. 5.29 apresenta-se a comparação entre os valores calculados pelo modelo IH-2VOF para C3, C5 e C9 de F_X , F_Y , $F_{X\,RMS}$ e $F_{Y\,RMS}$ e na Fig. 5.30 a comparação dos respectivos valores de C_D , C_L , $C_{D\,RMS}$ e $C_{L\,RMS}$.

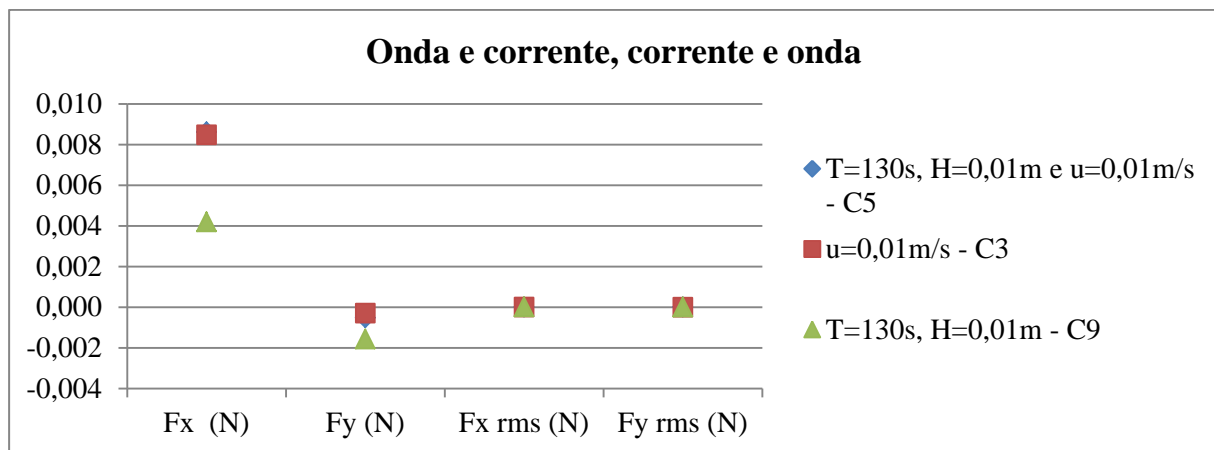


Fig. 5.29 - Forças horizontais, verticais e respectivos rms ; $T=130s$, $H=0,01m$ e $u=0,01m/s$; $u=0,01m/s$; $T=130s$ e $H=0,01m/s$.

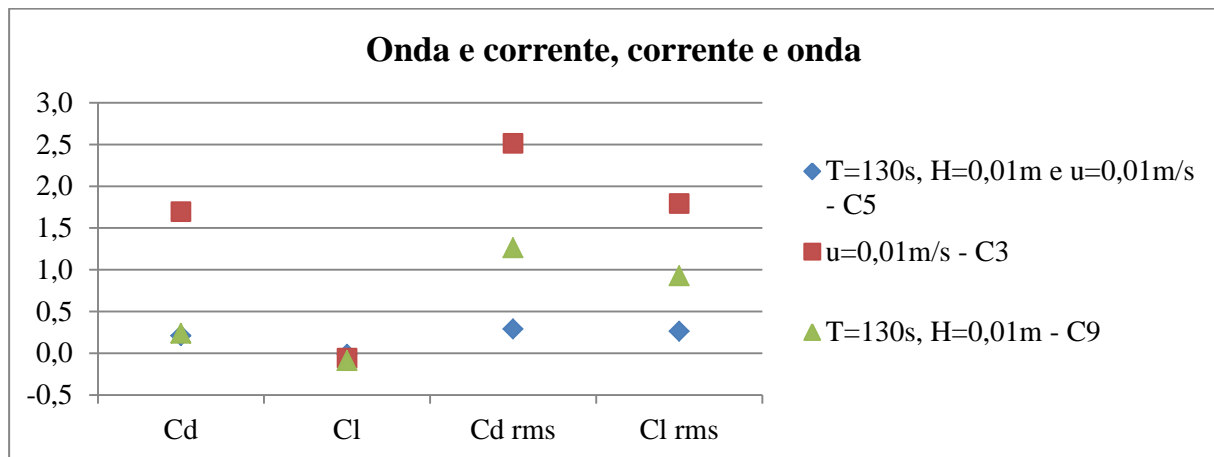


Fig. 5.30 - Coeficientes de arrasto, sustentação e respectivos *rms*; $T=130s$, $H=0,01m$ e $u=0,01m/s$; $u=0,01m/s$; $T=130s$ e $H=0,01m/s$.

Na Fig. 5.31 apresenta-se a comparação das frequências de desprendimento e número de Strouhal.

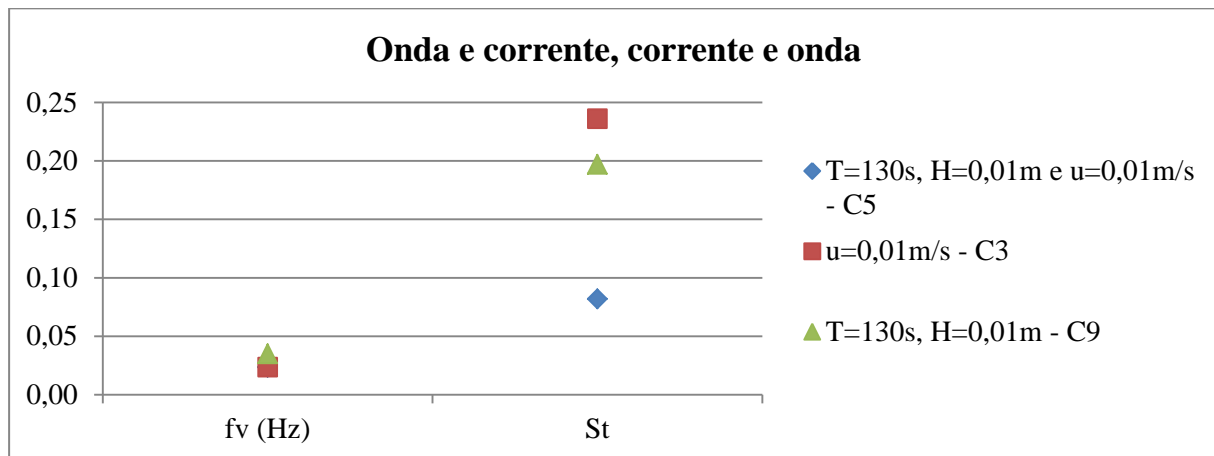


Fig. 5.31 –Frequências de desprendimento e número de Strouhal; $T=130s$, $H=0,01m$ e $u=0,01m/s$; $u=0,01m/s$; $T=130s$ e $H=0,01m/s$.

Constata-se que, para o caso de onda e corrente, tanto as forças horizontais como as verticais se aproximam mais do caso estacionário do que do caso oscilatório. Para o coeficiente de arrasto, este aproxima-se mais do caso oscilatório e o coeficiente de sustentação mais do estacionário. No que diz respeito à frequência de desprendimento dos vórtices, esta é bastante próxima da frequência do caso estacionário, ao passo que o número de Strouhal é bastante inferior ao dos casos estacionário e oscilatório.

Tendo em conta os resultados acima referidos, observa-se que há uma diferença considerável entre os casos com corrente e sem corrente no que diz respeito ao período de desprendimento dos

vórtices. Como se pode verificar, este período diminui com a diminuição da velocidade do escoamento, sendo que nos casos com corrente o valor é bastante próximo. No entanto, quando apenas se considera o efeito oscilatório, este valor baixa para pouco mais de metade, visto haver uma grande variação do campo de velocidade no tempo, velocidades horizontais máximas quando se está sob a crista, mínimas sob a cava e verticais máximas e mínimas nos zeros descendentes e ascendentes, respectivamente, e estas variações do campo de velocidades propiciam, de certa maneira, o desprendimento dos vórtices, pelo que se conclui que o efeito conjunto da corrente retarda o desprendimento.

5.4 Resultados do modelo

No Quadro 5.15 encontram-se resumidas as principais características das simulações realizadas, incluindo o respectivo regime de escoamento, determinado com base no número de Reynolds e na Fig. 2.9.

Quadro 5.15 – Resumo do número de Reynolds, Keulegan-Carpenter, Strouhal e regime de escoamento para os casos de estudo.

Caso	Re	KC	St	Regime
C1	200	-	0,215	Laminar - transição para turbulento
C2	200	-	0,215	Laminar - transição para turbulento
C3	1000	-	0,236	Subcrítico
C4	1000	-	0,250	Subcrítico
C5	2872	24,3	0,082	Subcrítico
C6	1869	3,7	-	Subcrítico
C7	1871	11,2	0,263	Subcrítico
C8	1872	16,8	0,237	Subcrítico
C9	1872	24,3	0,227	Subcrítico
C10	1872	24,3	0,198	Subcrítico

Da análise do Quadro 5.15, observa-se que, para os casos sem onda (de C1 a C4) o número de Strouhal aumenta com o aumento do número de Reynolds, seguindo a tendência descrita na literatura (Sumer & Fredsøe, 2006). Para os casos com onda e período crescente (de C6 a C10) constata-se que o número de Strouhal vai diminuindo com o aumento do número de Keulegan-Carpenter, exceptuando o caso C6, em que não existe desprendimento de vórtices. Por fim, há que referir o caso C5, composto por onda e corrente, que apresenta um número de Strouhal bastante inferior aos demais, já que neste caso, e de acordo com a equação (2.16), o cálculo de St implica uma divisão pela velocidade do escoamento, velocidade esta que é bastante mais elevada, levando a que o valor de St seja bastante menor.

Na Fig. 5.32 apresentam-se resultados de campo de velocidade, linhas de corrente e vorticidade obtidas com o modelo IH-2VOF para o caso de corrente estacionária e $Re=200$ com malha fina, C2, para dois instantes de tempo distintos.

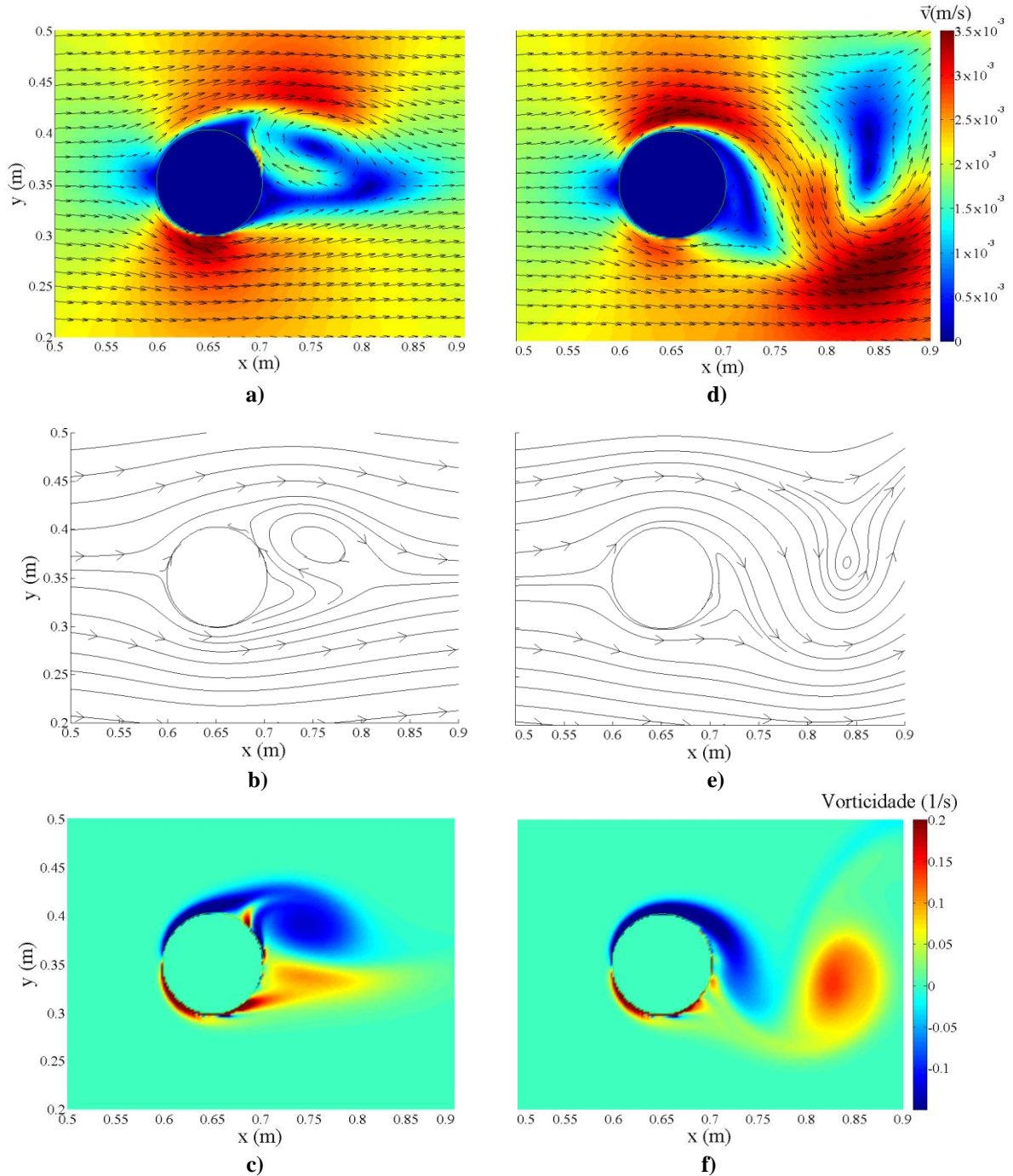


Fig. 5.32 - Velocidade a), linhas de corrente b) e vorticidade c) para o instante $t=150s$; Velocidade d), linhas de corrente e) e vorticidade f) para o instante $t=332s$; $Re=200$.

Na Fig. 5.32 a) observa-se a formação de um vórtice com sentido horário, vórtice este que é o primeiro observado neste escoamento, que pode também ser observado na Fig. 5.32 b), onde o escoamento tende a contornar o cilindro. Na Fig. 5.32 c) observa-se a já referida vorticidade, negativa e de dimensões consideráveis a azul e outro vórtice, contra-rotativo, já a formar-se. É de notar também

a elevada vorticidade nas camadas de corte, mais visível no contorno inferior, onde se registam cores mais próximas do vermelho. Nas seguintes Fig. 5.32 d), e) e f) observa-se a difusão do segundo vórtice na esteira: em d) constata-se que o centro do vórtice já possui velocidades muito pequenas; em e) este último facto é bastante visível, uma vez que o escoamento tende a contornar o vórtice, ajudando a difundi-lo na esteira; por fim, em f) é bastante visível o seu desprendimento, associado às elevadas velocidades observadas em d).

Na Fig. 5.33 apresentam-se resultados de campo de velocidade, linhas de corrente e vorticidade do modelo IH-2VOF para o mesmo caso (corrente uniforme), $Re=1000$, com malha fina, C2, para dois instantes de tempo distintos.

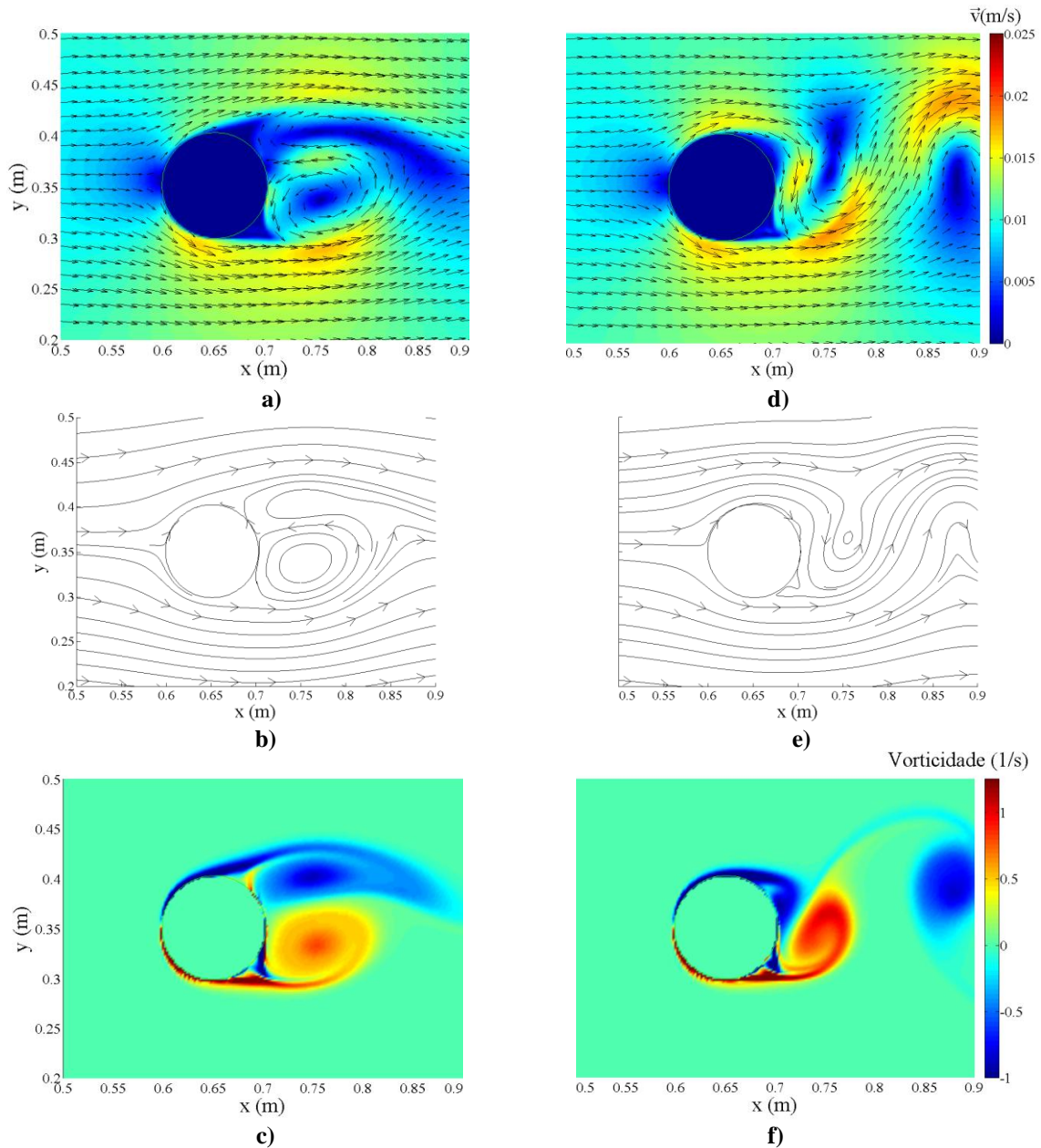


Fig. 5.33 - Velocidade a), linhas de corrente b) e vorticidade c) para o instante $t=50s$; Velocidade d), linhas de corrente e) e vorticidade f) para o instante $t=460s$; $Re=1000$.

Na Fig. 5.33 a) observa-se a formação de dois vórtices contra-rotativos (os primeiros a formarem-se no escoamento), situação bem visível em b) e c). Na Fig. 5.33 d), e) e f) verifica-se que, para este instante, o maior vórtice já se desprendeu e perdeu intensidade, enquanto um novo vórtice se desenvolve atrás do cilindro.

Na Fig. 5.34 apresentam-se os resultados de campo de velocidade, linhas de corrente e vorticidade do modelo IH-2VOF para o caso de onda e corrente, $Re=1000$ e $KC=24,3$ ($T=130s$), com malha fina, C5, para dois instantes de tempo distintos.

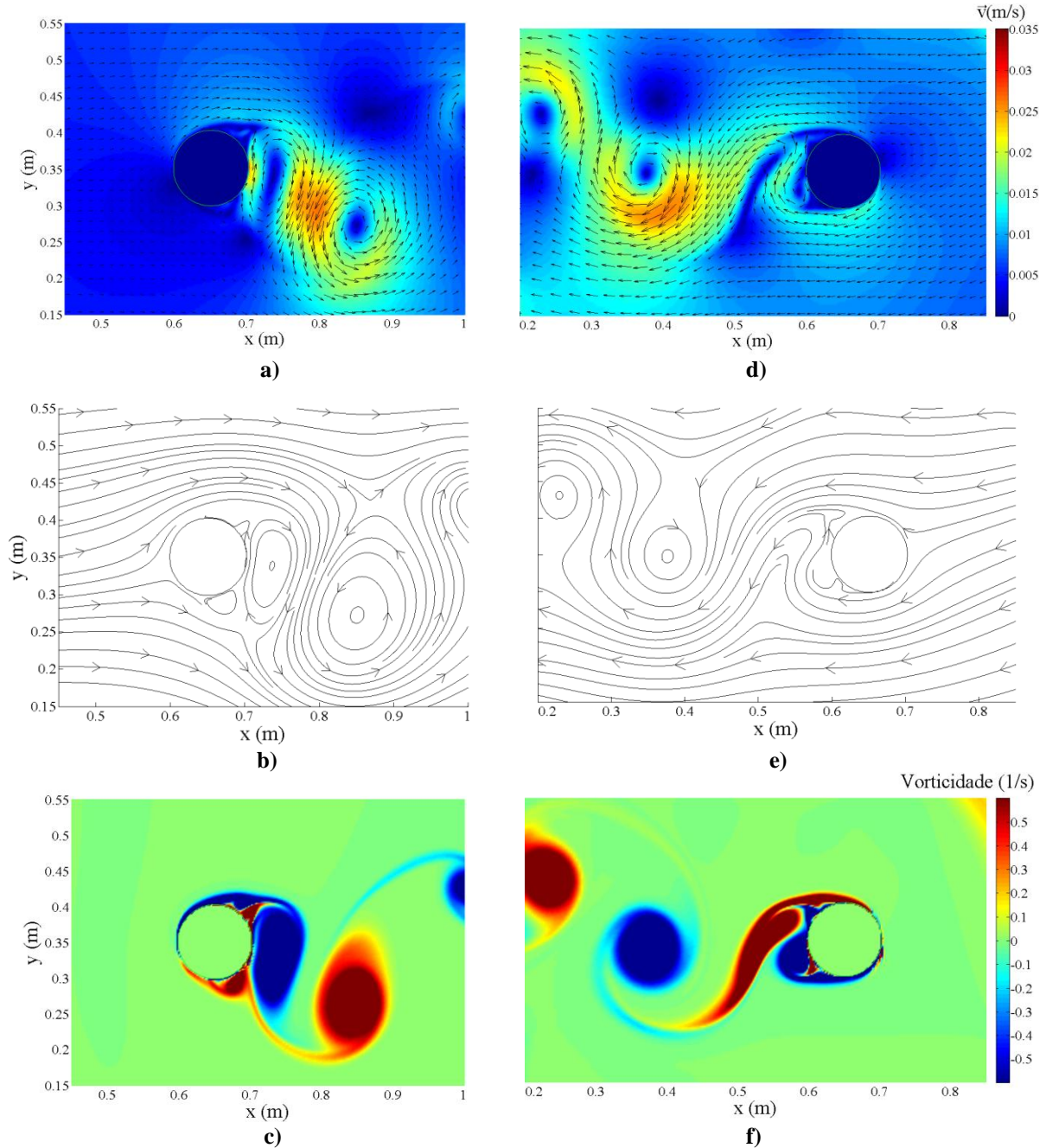


Fig. 5.34 - Velocidade a), linhas de corrente b) e vorticidade c) para o instante $t=60s$; Velocidade d), linhas de corrente e) e vorticidade f) para o instante $t=120s$; Re 1000 e $KC=24,3$ ($T=130s$).

Na Fig. 5.34 apresenta-se uma situação semelhante à da Fig. 5.33. Contudo, a existência de corrente altera em muito as condições de escoamento bem como os modos de desprendimento de vórtices. Na Fig. 5.34 a) observa-se a formação de um grande vórtice, cujo centro se encontra abaixo do limite inferior do cilindro, facto justificado pelo carácter orbital das partículas quando influenciadas pela presença da onda. Em b) observa-se que, além do vórtice observado em a), se encontra um outro vórtice a sotamar do cilindro, sendo que este é de menores dimensões. Tais constatações podem ser confirmadas pela Fig. 5.34 c) onde, além destes dois vórtices, se consegue observar que um terceiro já se desprendeu. Na Fig. 5.34 d) já se observam outros vórtices, desta vez formados a barlar, sendo que apenas se formaram a barlar devido à velocidade horizontal da onda que, periodicamente, é superior (e contrária) à velocidade da corrente. Em e) observa-se que os referidos vórtices estão a ser levados para barlar, no sentido da corrente devido à onda. Por fim, em f) observa-se que o maior vórtice de d) e e) acabou de se desprender, sendo que outro vórtice já se encontra em formação junto ao cilindro.

Na Fig. 5.35 apresentam-se resultados de campo de velocidade, linhas de corrente e vorticidade do modelo IH-2VOF para o caso só de ondas e sem desprendimento de vórtices, $KC=3,7$ ($T=20s$) com malha grosseira, C6, para dois instantes de tempo distintos.

Na Fig. 5.35 apresenta-se o caso de corrente oscilatória em que, devido ao baixo número de Keulegan-Carpenter, não ocorre desprendimento de vórtices, apesar destes se formarem. Em a) observam-se distintamente dois vórtices contra-rotativos, sendo que em b) e c) se identificam os mesmos e mais dois já a perder intensidade. Na Fig. 5.35 d) tem-se uma situação em tudo semelhante a a), apenas alterando o sentido da corrente devido à onda. Tal facto é facilmente visível em e), onde a corrente tem direcção e sentido de baixo para cima e da direita para a esquerda. Por fim, em f) observa-se que a vorticidade agora se formou a montante, situação contrária à de c) embora estes vórtices não se desprendam.

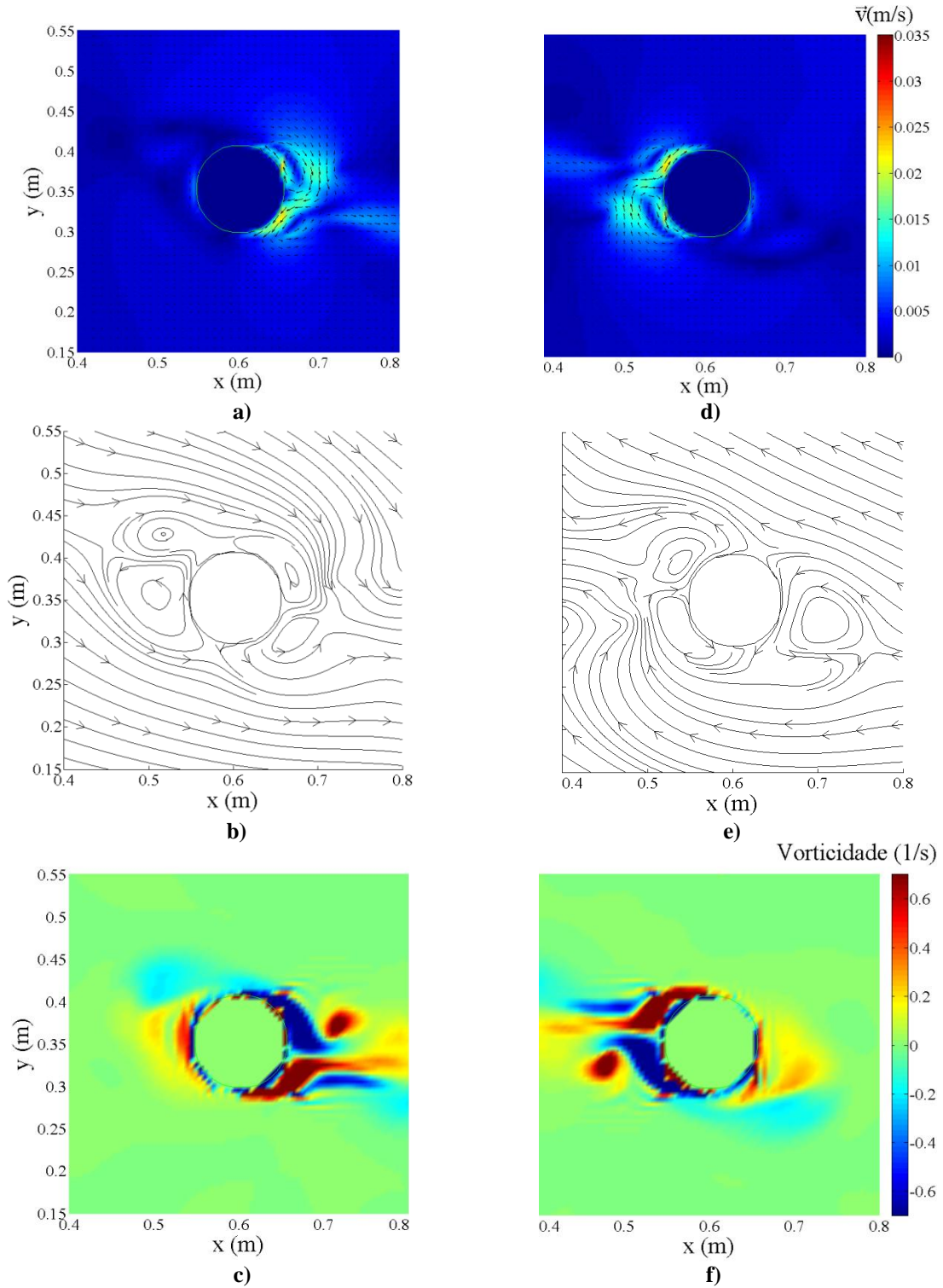


Fig. 5.35 - Velocidade a), linhas de corrente b) e vorticidade c) para o instante $t=90s$; Velocidade d), linhas de corrente e) e vorticidade f) para o instante $t=100s$; $KC=3,7$ ($T=20s$).

Finalmente na Fig. 5.36 apresentam-se resultados de campo de velocidade, linhas de corrente e vorticidade do modelo IH-2VOF para o caso só de ondas, $KC=11,2$ ($T=60s$) com malha grosseira, C7, para dois instantes de tempo distintos.

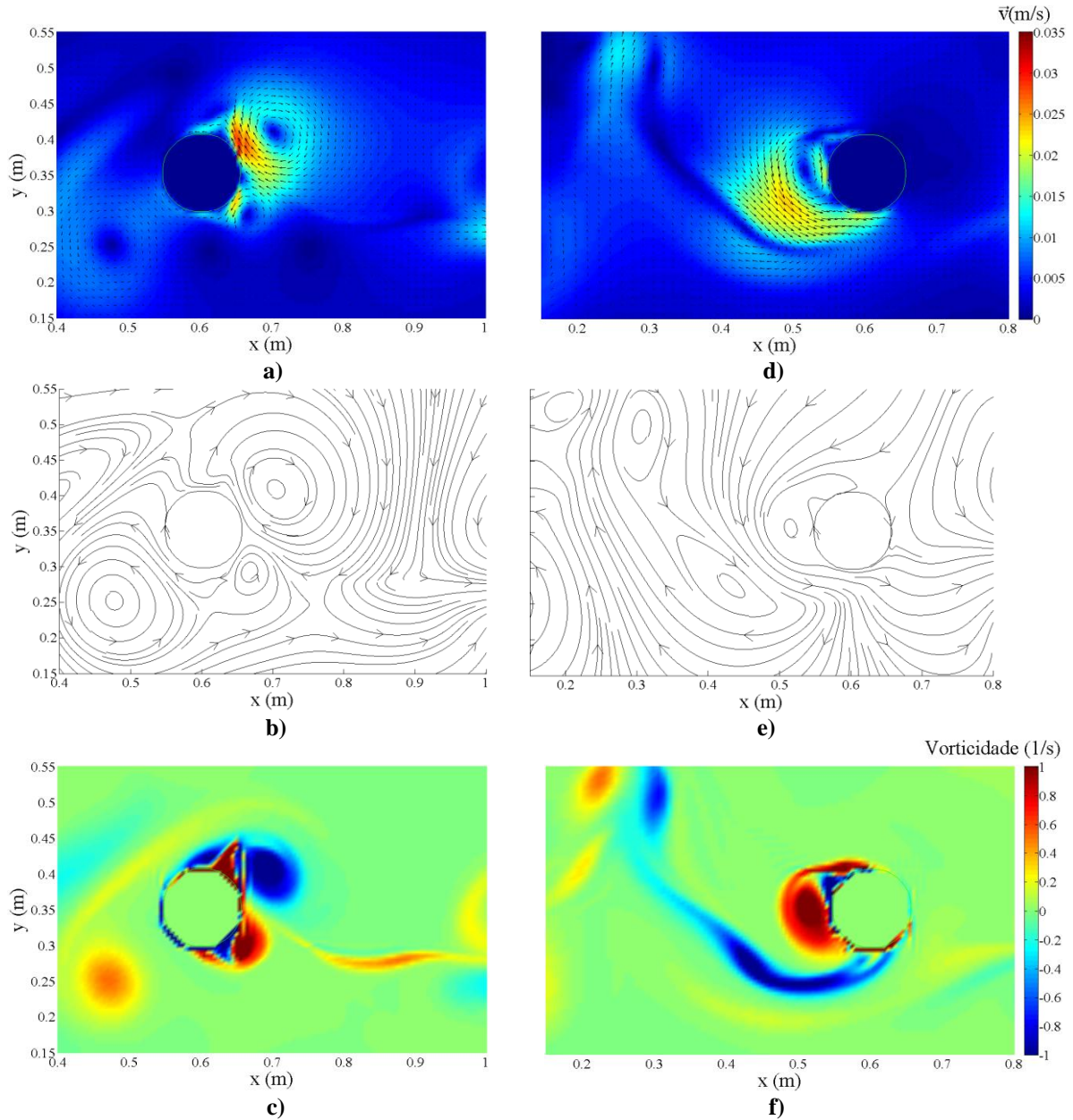


Fig. 5.36 - Velocidade a), linhas de corrente b) e vorticidade c) para o instante $t=150s$; Velocidade d), linhas de corrente e) e vorticidade f) para o instante $t=180s$; $KC=11,2$ ($T=60s$).

Na Fig. 5.36, à semelhança do que acontece para o caso apresentado na Fig. 5.34, o desprendimento de vórtices é periodicamente alternado para montante e para jusante. Na Fig. 5.36 a) observam-se três vórtices, dois a jusante e um a montante, tal como se pode ver em b) e c), sendo que nesta última se observa com maior clareza que o vórtice de montante já se desprendeu. Na Fig. 5.36 d) apenas se verifica alguma rotação das velocidades num sentido ascendente, a montante do cilindro. Em e) e f) este facto é mais visível, sendo que em f) já se observa mesmo a formação de um novo vórtice com elevada intensidade.

6. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Com o objectivo de analisar a interacção da onda com um emissário submarino através do modelo numérico IH-2VOF, foram efectuadas dez simulações considerando condições de escoamento estacionário, oscilatório e misto, correspondendo estas a correntes de 0,002 m/s e 0,01 m/s, ondas com altura de 0,01 m e períodos de 20s, 60s, 90s e 130s, e ainda a um caso com corrente de 0,01 m/s, onda com altura de 0,01 m e período de 130s.

Dos resultados obtidos, para o caso de corrente de 0,002 m/s ($Re=200$) não se obtiveram resultados muito satisfatórios, quando comparados com os obtidos pelo FLUENT, no que diz respeito ao coeficiente de arrasto e de sustentação. No entanto, todas as outras grandezas apresentam resultados próximos dos da literatura (Didier, 2012). Para os demais casos, apesar de apresentarem valores coerentes de forças no emissário, estes resultados podem ser mais precisos se se utilizarem discretizações suficientemente refinadas no contorno do emissário. A dimensão do domínio de cálculo também influencia os resultados finais, uma vez que se verifica uma considerável blocagem.

Para o caso de corrente de 0,01 m/s ($Re=1000$) os resultados são bastante mais satisfatórios, tanto para malha grosseira como fina, sendo que todas as grandezas em questão se aproximam dos resultados obtidos com o FLUENT. No entanto, não se verifica uma convergência real dos valores em função da discretização, uma vez que os valores das forças horizontal, vertical e coeficientes de arrasto e sustentação são mais próximos dos da literatura para o caso de malha grosseira enquanto os valores de frequência de desprendimento, período e número de Strouhal são mais próximos no caso de malha fina.

Comparando os casos de corrente, $Re=200$ e $Re=1000$, observa-se que todas as grandezas em questão variam conforme esperado: aumento de forças e coeficiente de sustentação, diminuição do coeficiente de arrasto e, por fim, aumento da frequência de desprendimento (e consequente diminuição do período) e do número de Strouhal com o aumento do número de Reynolds.

Para os casos de onda, observa-se que a força horizontal aumenta com o período, a força vertical diminui (sendo que os coeficientes de arrasto e sustentação seguem a mesma tendência), o período de desprendimento também aumenta com o período e, por fim, o número de Strouhal diminui.

Concluindo, para os casos de regime estacionário e oscilatório, os resultados obtidos são os esperados no que se refere ao desprendimento de vórtices e às forças obtidas. No caso de escoamento oscilatório e corrente, uma vez que, periodicamente, as velocidades horizontais são de direcção contrária à da corrente (aquando da cava da onda), ocorre um retardamento do eventual desprendimento de vórtices, tal como referido na literatura.

É também importante referir a presença da camada limite no fundo nos resultados do modelo, já que a condição de deslizamento livre no contorno inferior do domínio de cálculo não se encontra implementada.

Quanto à aplicabilidade do modelo numérico IH-2VOF para este estudo verifica-se que, apesar deste não apresentar a precisão numérica necessária para casos de escoamentos estacionários com velocidades muito reduzidas, comporta-se bastante bem para casos de escoamentos estacionários com números de Reynolds superiores a 1000, apesar do modelo ter sido desenvolvido para casos específicos de interação onda-estrutura. Outro problema, no entanto, surge quando se pretende implementar casos na ausência de agitação, sendo necessária, para o efeito, a edição manual dos ficheiros referentes à agitação de modo a anulá-los, criando assim condições de agitação nula.

No entanto, o IH-2VOF é um modelo bastante versátil e preciso, podendo simular um enorme espectro de problemas, sendo que para o presente caso de emissário submarino seria necessário ir ao limite computacional do modelo: domínio computacional maior que o realizado, malha muito mais refinada e maior tempo de cálculo. O refinamento da malha é, porventura, um dos maiores inconvenientes do modelo uma vez que tal simulação limite poderia levar diversos dias e exigir um grande esforço computacional.

Quanto a possíveis trabalhos futuros, seria interessante a análise de resultados com condições semelhantes às obtidas em modelo físico ou no mais recente modelo numérico IH-3VOF, modelo este que permitiria estudar fenómenos de vorticidade tridimensionais (como por exemplo a chamada instabilidade de Honji – vórtices em forma de cogumelo segundo a direcção do escoamento) e analisar a influência dos fenómenos bidimensionais num domínio tridimensional.

Continuando neste tema, poderia ser interessante também verificar diversos valores da literatura, (Sumer & Fredsøe, 2006), valores estes em condições semelhantes ou não às aplicadas na presente dissertação. Poderia, por exemplo, ser estudada a influência de maiores alturas de onda, ondas irregulares, maiores velocidades de escoamento (desde que se conserve a massa no modelo), diferentes ângulos de ataque da corrente ou da onda, ou até mesmo outros regimes de escoamento.

Dado que o fenómeno da vorticidade está presente num grande leque de estruturas submarinas, os estudos das chamadas *VIV*, vortex induced vibrations, reveste-se de grande importância tal como, por exemplo, em fundações de plataformas petrolíferas, ‘*risers*’ (tubagens de escoamento de hidrocarbonetos do poço no leito marinho para a superfície) ou até mesmo em fundações de estruturas, como por exemplo terminais portuários, fundações estas situadas em zonas com correntes e estados de agitação relevantes. Estes estudos das *VIV* são de extrema importância, uma vez que é necessário evitar que a frequência de desprendimento de vórtices se aproxime da frequência própria das estruturas

de modo a não se observar o fenômeno de ressonância sendo que técnicas, por exemplo de redução de esforços, alteram relevantemente as topologias do escoamento.

Assim, mais estudos poderão ser feitos no âmbito da vorticidade em torno de cilindros, estudando a influência da libertação de vórtices nas oscilações do cilindro, considerando o mesmo com ligação ao fundo rígida ou elástica.

Para concluir, constata-se que esta temática é bastante diversificada e propícia para desenvolvimentos futuros, tanto a nível da análise numérica como da análise em modelo físico, não obstante estas duas grandes componentes de análise serem cada vez mais dependentes uma da outra.

Bibliografia

- Afonso, C., Epifânio, L., & Figueira, P. (2007). *Projecto do emissário submarino da ETAR Lagoa/Meco*. 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária. Lisboa.
- Didier, E. (2012). *Modelação com o FLUENT de escoamentos em torno de cilindros*. Comunicação pessoal. LNEC, Lisboa.
- Engineers, U. S. (2006). *Coastal Engineering Manual Part II Chap1 - Water Wave Mechanics*. Research Center. Department of the Army, EUA: Waterways Experiment Station, Corps of Engineers.
- ETERMAR - Engenharia e Construção, S.A. (Junho de 2010). Obtido em Março de 2012, de http://www.etermar.pt/publicacoes_obras.htm - *Emissários e outras tubagens submarinas*.
- Lara, J., Losada, I., & Guanche, R. (2006). *Modelo Avanzado RANS para la Interacción Flujo Estructura - Manual del usuario. Versión 1.01*. Santander, Cantábria, Espanha: GIOC Universidad de Cantabria.
- MathWorks, T. (1984-2012). *Product Documentation*. Obtido de MathWorks Help: <http://www.mathworks.com/help/techdoc/>
- Mota, N. (2009). *Influência da Direcção da Propagação na Pressão em Torno de um Quebra-Mar Submerso*. IST-UTL, Lisboa.
- Neves, M. G., & Reis, M. T. (2003). *Comportamento Estrutural de Emissários Submarinos - Emissários submarinos em Portugal*. Relatório 21/2003, LNEC, Departamento de Hidráulica e Ambiente, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Lisboa.
- Parxotomo, D. (2011). *Estudo numérico de uma técnica de redução de esforços numa estrutura cilíndrica circular*. Tese de mestrado da FCT-UNL, Lisboa.
- Pinho, A. L. (2011). *Redução de tensões em risers rígidos de plataformas TLP*. Dissertação de mestrado da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.
- Pita, C. A. (1986). *Forças actuates nos blocos do manto resistente de quebra-mares de talude*. Relatório 207/86, LNEC, Departamento de Hidráulica, Núcleo de Portos e Praias, Lisboa.
- Sumer, B. M., & Fredsøe, J. (2006). *Advanced Series on Ocean Engineering - Volume 26 - Hydrodynamics around cylindrical structures* (Revised ed.). World Scientific.
- Williamson, C. (1996). *Vortex dynamics in the cylinder wake*. Annual review of fluids mechanics, 28, 447-539.
- Zang, Z., Teng, B., Bai, W., & Cheng, L. (2007). A finite volume solution of wave forces on submarine pipelines. Ocean Engineering 34, 1955-1964.

ANEXOS

Anexo A INTERFACE DO SOFTWARE CORAL

Neste anexo apresenta-se o *software* CORAL, ferramenta de criação e geração de malhas de cálculo computacional.

Nas seguintes figuras o domínio computacional encontra-se sob fundo preto, sendo que as definições do mesmo domínio, subzonas em x e y , nível de água e o emissário, se encontram por baixo da zona de visualização.

Na Fig. A.1 apresenta-se o domínio completo de uma malha fina já com as subzonas definidas. Ao centro surge o cilindro, definido como “Obstaculo 1” e a azul claro o nível água em repouso, definida como “Agua 1”. Estas duas características do domínio são definidas no campo central “Objects”.

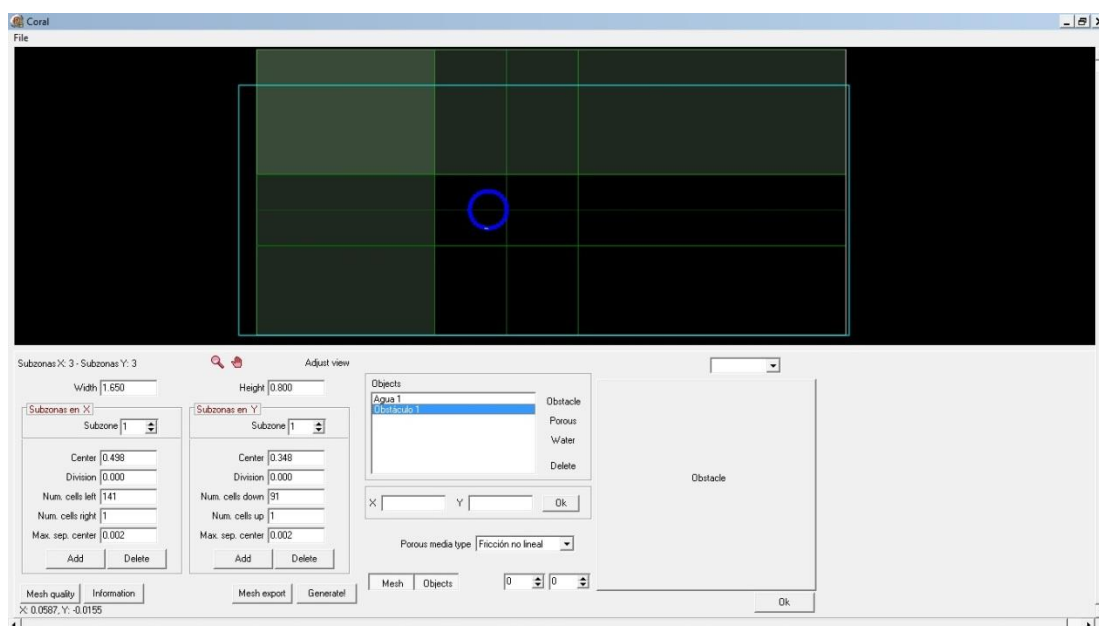


Fig. A.1 - Representação do ambiente gráfico do CORAL com subzonas, água e cilindro definidos.

Na Fig. A.2 apresenta-se uma aproximação visual do cilindro em que se pode observar bem a sua definição através de um conjunto significativo de pontos, de modo a que o polígono criado se aproxime de uma circunferência.

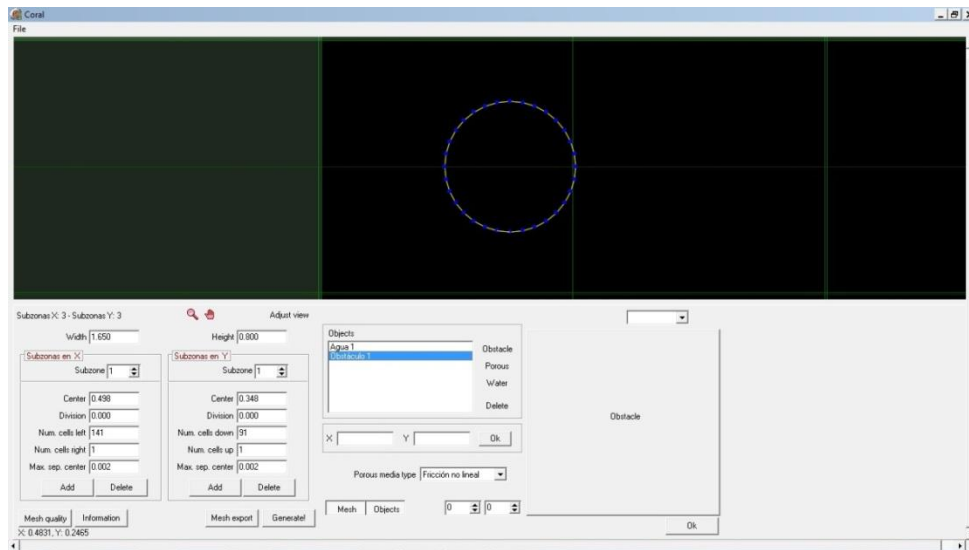


Fig. A.2 - Aproximação da visualização do domínio à zona do emissário.

Na Fig. A.3 surge novamente uma perspectiva do domínio computacional completo, sendo que aqui já se observa a malha propriamente dita, gerada pelo comando “Generate!” (este comando, além de gerar a malha, cria também o ficheiro “*malha1.dat*”). Uma vez que esta malha é de dimensões variáveis, observa-se bastante bem a maior densidade de elementos na área central, zona do cilindro (subzona onde as dimensões em x e y são iguais), definida pelas subzonas centrais $x2$ e $y2$.

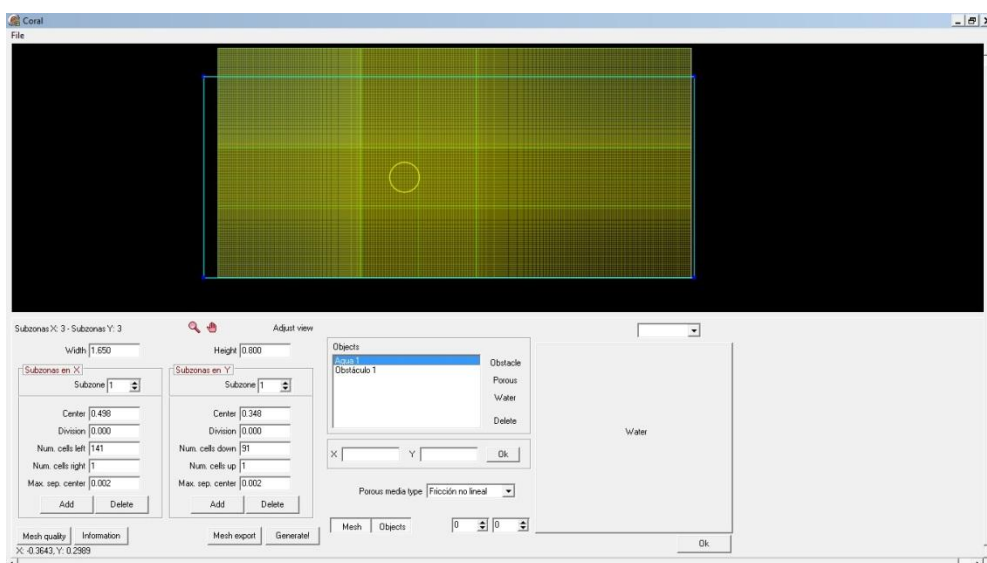


Fig. A.3 - Domínio computacional com a malha gerada.

Por fim, de modo a se obter o ficheiro “*mesh.mes*” basta executar o comando “Mesh export”. De modo a avaliar a qualidade da malha, executa-se o comando “Mesh quality” tal como se pode ver na Fig. A.4.

Nesta última figura observa-se bastante bem a variação, tanto em x como em y , da dimensão das células – decrescem dos extremos do domínio até à zona do cilindro, zona onde as dimensões são constantes nas duas direcções, ou seja, convergem das máximas dimensões junto às fronteiras para a mínima dimensão nas subzonas centrais.

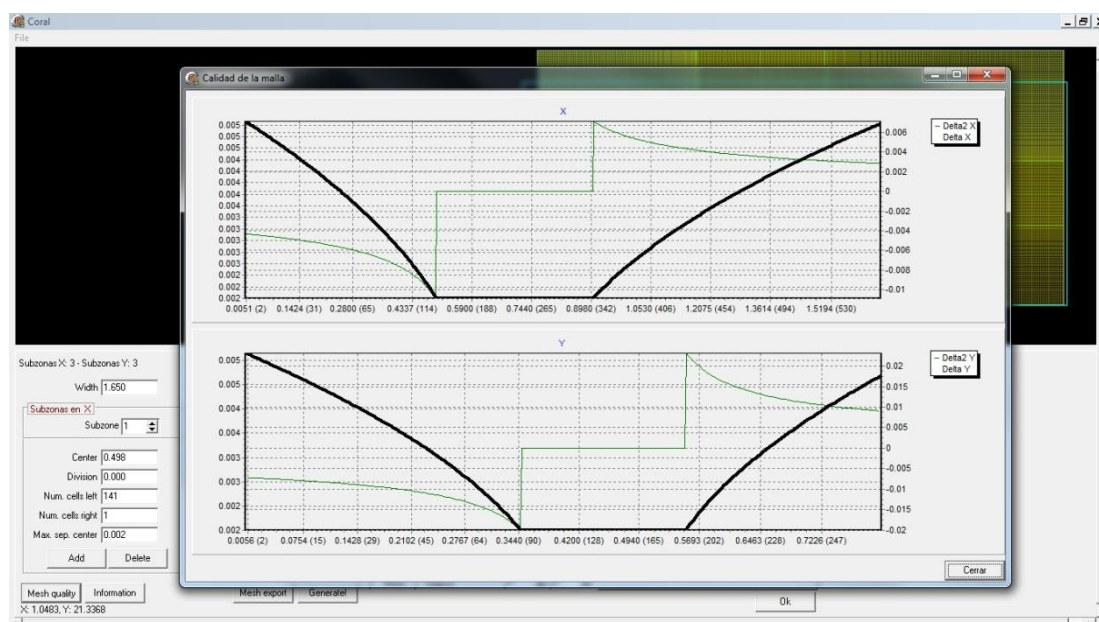


Fig. A.4 - Janela de visualização do comando 'Mesh quality'.

Anexo B BATEDOR NUMÉRICO

Neste anexo apresenta-se o software “Generador de Oleaje” utilizado para criar as condições de agitação necessárias para o modelo IH-2VOF.

Conforme descrito no ponto 3.5, a série temporal das elevações da superfície livre e velocidades horizontal e vertical devidas à onda são geradas pelo método do batedor numérico sendo este, concretamente, um conjunto de funções programadas na ferramenta MATLAB. Nas seguintes figuras encontram-se as diferentes janelas a que se recorreu para a presente dissertação. Na Fig. B.1 apresenta-se a janela principal do programa gerador de ondas.



Fig. B.1 - Janela principal da ferramenta geradora de ondas em MATLAB.

Na Fig. B.2 apresenta-se a janela de geração de onda para caso desta ser regular. É necessário introduzir a denominação da onda, sua altura e período, a profundidade, a duração da série temporal, a frequência de amostragem dos dados (25Hz para o presente caso) e a fase da onda.

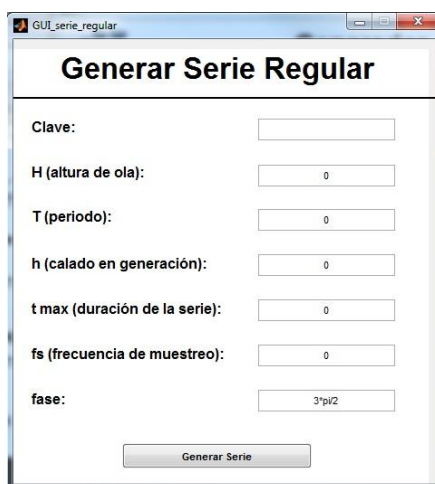


Fig. B.2 - Janela de geração de onda regular.

Por fim há que definir o batedor. Este foi definido como estático e para sua correcta definição há que preencher os campos de profundidade, tempo de atenuação, teoria de onda e correcção da deriva de Stokes. Na Fig. B.3 encontra-se a janela respectiva do batedor estático.

The image shows a software window titled "GUI_est_regular" with a subtitle "Pala Estática Regular". Inside the window, there are several labeled input fields and a dropdown menu. The "Clave:" field contains the text "onda44". The "h (calado en generación):" field contains the value "0.7". The "t suavizado (inicio suave):" field contains the value "0". Below these, there is a "Teoría:" label followed by a dropdown menu that is currently open. The menu lists six options: "Teoría lineal sin extrapolación", "Teoría lineal sin extrapolación" (which is highlighted in blue), "Teoría lineal con extrapolación", "Stokes II", "Stokes V", and "Cnoidal". To the left of the dropdown menu, the text "Corrección deriva de Stokes:" is visible. At the bottom center of the window is a button labeled "Generar".

Fig. B.3 - Janela de definição do batedor.

Anexo C CÓDIGO MATLAB

Neste anexo apresentam-se os ficheiros desenvolvidos no âmbito da presente dissertação na ferramenta computacional MATLAB necessários para um correcto cálculo de F_X , F_Y , $F_{X\ RMS}$, $F_{Y\ RMS}$, C_D , C_L , $C_{D\ RMS}$, $C_{L\ RMS}$, T_V , f_V e número de Strouhal, bem como para a visualização dos vectores de velocidade \vec{V} , linhas de corrente e vorticidade.

Para tal foram criados os seguintes ficheiros:

- ‘tese_1.m’;
- ‘tese_2.m’;
- ‘tese_3.m’;
- ‘calc_grandezas.m’;
- ‘le_v_e_vort.m’;
- ‘plot_e_quiver.m’;
- ‘plot_e_streamslice.m’;
- ‘plot_e_vortex.m’.

Os três primeiros ficheiros foram criados de modo a extrair a informação necessária, dentro de todas as grandezas calculadas pelo modelo IH-2VOF, e gravá-la. No ficheiro ‘tese_1.m’ são lidos os ficheiros de pressão e escrito um ficheiro com todos os valores do tempo. Dentro deste ficheiro é executado o ficheiro ‘tese_2.m’, que escreve e grava num ficheiro de texto as pressões no contorno do cilindro, para cada instante de tempo. No ficheiro ‘tese_3.m’ calculam-se, com base nas pressões em torno do cilindro, as forças horizontais e verticais, bem como os coeficientes de arrasto e de sustentação para todo o tempo da simulação.

O seguinte ficheiro, ‘calc_grandezas.m’, é o ficheiro onde se efectuam os cálculos cujos resultados são apresentados na presente dissertação, calculando F_X , F_Y , $F_{X\ RMS}$, $F_{Y\ RMS}$, C_D , C_L , $C_{D\ RMS}$ e $C_{L\ RMS}$. Posteriormente, e sabendo que o sinal do C_L só é periódico a partir de um dado instante, é aplicada uma Transformada Rápida de Fourier de modo a se obter a frequência de desprendimento dos vórtices, f_V e, com base neste valor, também o período de desprendimento e o número de Strouhal.

Os quatro ficheiros seguintes foram desenvolvidos de modo a auxiliar a interpretação dos resultados obtidos para as grandezas em estudo, auxílio este sob a forma visual das velocidades, linhas de corrente e vorticidade.

O ficheiro *'le_v_e_vort.m'* lê as velocidades horizontais, verticais e vorticidade para dados intervalos de visualização em x e no tempo e grava as respectivas variáveis. Os ficheiros *'plot_e_quiver.m'*, *'plot_e_streamslice.m'* e *'plot_e_vortex.m'* executam a apresentação das velocidades através de vectores e cores (sendo as cores representativas apenas da intensidade da velocidade), linhas de corrente e vorticidade.

Anexo C.1 Ficheiro 'tese_1.m'

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-----tese_1.m-----%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----%
%SÉRGIO CAPELA E SILVA - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO - MODELAÇÃO
%NUMÉRICA DA INTERACÇÃO ONDA-ESTRUTURA EM EMISSÁRIOS
%SUBMARINOS - MARÇO DE 2012-----%
%-----%
%Lê os ficheiros p0*.dat para obter os valores de pressão no contorno do cilindro e
%t0*.dat para extrair a função VOF de cada célula de modo a retirar a pressão
%hidrostática à parcela total da pressão-----%
%-----%
%INÍCIO
close all
clear all
clc
tic
disp('#####Sérgio Capela e Silva - Dissertação de mestrado#####');
disp('+++++++Lê pressões e calcula Fx, Fy, Cd, Cl e St+++++++');
[N,S]=weekday(datestr(now),'long');
disp(S);
disp(datestr(now));
clear all

%Escolha do caminho da corrida
corr=inputdlg('Corrida','Corrida');
corr=char(corr);
corrida=str2double(strcat(corr(8),corr(9)));

if corrida<11 corridas='corridas1_10\';
elseif corrida<21 corridas='corridas11_20\';
elseif corrida<31 corridas='corridas21_30\';
elseif corrida<41 corridas='corridas31_40\';
elseif corrida<51 corridas='corridas41_50\';
end

pause(3);

```

```

%Ir ao directório correcto e devolver o número de ficheiros
path=strcat('D:\faculdade\dissertacao\malha\',corridas,corr);
caso='p';
wgfiles=dir(strcat(path,caso));
numfiles=length(wgfiles)-2;
clave=caso;
caso=strcat(caso);
disp(corr);
%Iniciação de contadores
passo=1;
cont=0;

```

```

%Abre o input para extrair dimensão da malha
INPUT=[path 'input' ];
fid=fopen(INPUT);
fgetl(fid);
for i=1:40
    A=fgetl(fid);
    if i==17    B=fgetl(fid); end
    if i==18    C=fgetl(fid); end
end
fclose(fid);
fid=fopen(INPUT);
fgetl(fid);
%Abre o input para extrair ui
i=1;
for i=1:40
    A=fgetl(fid);
    if i==13    ESCOAM=fgetl(fid); end
end

```

```

%Massa volúmica da água
ro=1.000;
dum=find(ESCOAM==' ');
u=0;
u_esc=str2num(ESCOAM(dum(2)+2: dum(2)+5));

```

```

dum=find(B==' ');
nivel=str2num(B(dum(1)+1: dum(2)-1));
dum=find(C==' ');
xini=str2num(C(dum(2)+1: dum(3)-1));
xfin=str2num(C(dum(3)+1:dum(4)-1));
yini=str2num(C(dum(4)+1: dum(5)-1));

```



```
yfin=str2num(C(dum(5)+1: dum(6)-1));
xc=load([path 'xc']);
yc=load([path 'yc']);
xc(1:xini-1)=[];
xc(xfin+1-(xini-1):end)=[];
yc(1:yini-1)=[];
yc(yfin+1-(yini-1):end)=[];
n=length(xc);
m=length(yc);
```

```
%Abre o ficheiro u_ext.dat para extrair a velocidade máxima devido à onda, na cota
correspondente %ao centro do cilindro
u_max=load(strcat(path,'u_ext.dat'));
u=max(u_max(59,:))+u_esc;
if u==0
    u_max=load(strcat(path,'u_ext.dat'));
    if m==126
        u=max(u_max(59,:))+u_esc;
    end
    if m==263
        u=max(u_max(123,:))+u_esc;
    end
end
```

```
%Calcula o número de reynolds
reynolds=1*u*0.1/(1*10^-6);
display('Número de Reynolds de');
format shortG;
disp(reynolds);
disp('Velocidade do escoamento (m/s)');
disp(u);
clear u_max
```

```
%Lê o malha1.dat e extrai as dimensões dx e dy
malha1=[path 'malha1.dat'];
fid1=fopen(malha1);
fgetl(fid1);
for ii=1:27
    d=fgetl(fid1);
    if ii==6    dx=str2num(fgetl(fid1));end
end
dy=dx;
```

```
%Se existirem, apaga os ficheiros pressoes.txt, fx.txt, fy.txt, cd.txt e cl.txt
if exist(strcat(path,'pressoes.txt'))==2
    delete(strcat(path,'pressoes.txt'))
end
if exist(strcat(path,'fx.txt'))==2
    delete(strcat(path,'fx.txt'))
end
if exist(strcat(path,'fy.txt'))==2
    delete(strcat(path,'fy.txt'))
end
if exist(strcat(path,'cd.txt'))==2
    delete(strcat(path,'cd.txt'))
end
if exist(strcat(path,'cl.txt'))==2
    delete(strcat(path,'cl.txt'))
end
if exist(strcat(path,'tempo.txt'))==2
    delete(strcat(path,'tempo.txt'))
end
```

```
%Ciclo for para vários ficheiros p00*.dat
for i=1:numfiles
    %Ficheiro p00*.dat
    file=strcat(path,caso,clave,dec2base(i,10,3),'.dat');
    %Ficheiro t00*.dat
    filesup=strcat(path,'\t\t',dec2base(i,10,3),'.dat');
    %Abre o ficheiro p00*.dat
    fid2=fopen(file,'r');
    %Abre o ficheiro t00*.dat
    fidsup=fopen(filesup,'r');
    %Cria e abre o ficheiro com o tempo de análise, tempo.txt
    fidtempo=fopen(strcat(path,'tempo.txt'),'a');
    %Cria e abre o ficheiro pressoes.txt
    fid3=fopen(strcat(path,'pressoes.txt'),'a');
    continuar=true;
    tt=[];
    A=[];
    AA=[];
    disp('Gravando ficheiro pressões.txt');
```

```
%Lê cada ficheiro p00*.dat e escreve uma coluna de tempo e outra matriz com as
%pressões
cont_tempo=1;
while continuar
    t=fread(fid2,1,'real*8');
    T1=fread(fid2,[n,m],'real*4');
    Sup=fread(fidsup,[n,m],'real*4');%lê a matriz n*m da função VOF (t0*.dat)
    cont=cont+1;

    if notfeof(fid2)
        if (t>=0 && mod(cont,passo)==0)

            if m==126
                tt=[tt t];
                A(:,cont)=T1(:,cont);
                %Restringe a extracção da função VOF ao domínio horizontal onde se encontra
                %o cilindro no caso da malha grosseira
                Suplivre(:,cont)=Sup(:,80:101);
                %Escreve as pressões em torno do cilindro para cada passo de tempo no caso
                %da malha grosseira
                tese_2
            elseif m==263
                tt=[tt t];
                A(:,cont)=T1(:,cont);
                Suplivre(:,cont)=Sup(:,193:244);
                tese_2
            end
            h.waitbar=length(tt)/1000;
        end
    else
        continuar=false;
        fclose(fid2);
    end
end
delete(h.waitbar);
%Escreve o ficheiro tempo.txt
fprintf(fidtempo,'%8.4f \n',tt);
cont=0;
passo=1;
continuar=true;
disp('Exportação dos ficheiros pressoes.txt e tempo.txt bem sucedida');
fclose(fid3);
end
```

```
fclose('all');
tempomin=num2str(toc/60);
temposeg=num2str(toc/1);
if (toc/60)<1
    disp(['tempo do calculo de' blanks(1) temposeg blanks(1) 'segundos'])
else
    disp(['tempo do calculo de' blanks(1) tempomin blanks(1) 'minutos'])
end
%lê o ficheiro pressoes.txt, calcula e escreve fx.txt, fy.txt, cd.txt e cl.txt para a serie
%temporal abrangida pelo for i=1:numfiles
tese_3
%FIM
```

```

    Dy=[Dy Dyc(variavel)-Dyc(variavel-1)];
end

Dy=Dy';
Mc_supl=[];
variavel=1;
for variabel=1:m-1%length(Dyc)
    Mc_supl=[Dyc*Supl_livre(length(Dyc)-1,:);];
end

```

```
%Calcula a pressão hidrostática para o domínio horizontal em que o cilindro
%está inserido
Press_hidrost=[];
Press_sem_h=[];
Press_hidrost=ro*9.81.*Prof;
Press_hidrost_refinada=repmat(Press_hidrost(47:68.1),1,22);
```

78

end

```
%CASO DA MALHA 126*246
%Escreve o ficheiro pressoes.txt
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(1,12));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(1,13));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(1,14));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(1,15));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(1,16));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(2,17));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(3,18));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(4,19));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(5,20));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(6,21));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(7,22));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(8,22));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(9,22));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(10,22));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(11,22));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(12,22));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(13,22));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(14,22));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(15,22));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(16,22));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(17,21));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(18,20));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(19,19));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(20,18));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(21,17));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(22,16));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(22,15));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(22,14));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(22,13));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(22,12));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(22,11));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(22,10));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(22,9));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(22,8));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(22,7));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(21,6));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(20,5));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(19,4));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(18,3));
```

```
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(17,2));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(16,1));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(15,1));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(15,1));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(13,1));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(12,1));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(11,1));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(10,1));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(9,1));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(8,1));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(7,1));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(6,2));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(5,3));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(4,4));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(3,5));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(2,6));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(1,7));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(1,8));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(1,9));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(1,10));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(1,11));
```

```
elseif m==263
    AA2=flipud(A(96:147,193:244,cont));
    Supl_livre=flipud(Supl_livre(:,cont));
    %Dimensões das linhas e colunas
    linha=size(AA2,1);
    coluna=size(AA2,2);

    Dyc=[];
    variavel=1;
    for variavel=1:m-1
        if variavel==1 Dyc=(yc(2)-yc(1))/2;
        else
            Dyc=[Dyc (yc(variavel)-yc(variavel-1))+Dyc(variavel-1)];
        end
    end
    Dyc=Dyc';

    Dy=[];
    variavel=2;
    for variavel=2:length(Dyc)
        Dy=[Dy Dyc(variavel)-Dyc(variavel-1)];
    end
end
```

```

end
Dy=Dy';

Mc_supl=[];
variavel=1;
for variavel=1:m-1%length(Dyc)
    Mc_supl=[Dyc*Supl_livre(length(Dyc)-1,:);]
end

Prof=[];
variavel=1;
for variavel=1:m-2%length(AA2)
    if variavel==1
        if Supl_livre(variavel,:)==0 Prof=[Prof 0];
        else
            Prof=[Prof Dy(variavel)+Mc_supl(variavel,:);]
        end
    else
        if Supl_livre(variavel,:)==0 Prof=[Prof 0];
        else
            Prof=[Prof (Dy(variavel-1)+Prof(variavel-1))];
        end
    end
end
Prof=Prof';

Press_hidrost=[];
Press_sem_h=[];
Press_hidrost=ro*9.81.*Prof;
Press_hidrost_refinada=repmat(Press_hidrost(96:147,1),1,52);

for li=1:linha
    for cj=1:coluna
        Press_sem_h(li,cj)=AA2(li,cj)-Press_hidrost_refinada(li,cj);
        if AA2(li,cj)==0 Press_sem_h(li,cj)=0;    end
    end
end

%CASO DA MALHA 263*557
%Escreve o ficheiro pressoes.txt
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(1,27));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(1,28));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(1,29));

```

```

fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(1,30));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(1,31));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(1,32));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(1,33));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(2,34));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(2,35));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(2,36));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(3,37));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(3,38));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(4,39));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(4,40));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(5,41));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(6,42));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(7,43));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(7,44));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(8,45));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(9,46));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(10,46));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(11,47));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(12,48));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(13,49));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(14,49));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(15,50));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(16,50));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(17,51));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(18,51));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(19,51));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(20,52));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(21,52));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(22,52));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(23,52));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(24,52));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(25,52));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(26,52));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(27,52));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(28,52));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(29,52));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(30,52));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(31,52));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(32,52));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(33,52));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(34,51));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(35,51));

```

81

```
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(6,11));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(5,12));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(4,13));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(4,14));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(3,15));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(3,16));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(2,17));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(2,18));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(2,19));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(1,20));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(1,21));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(1,22));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(1,23));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(1,24));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(1,25));
fprintf(fid3,'%8.6f %8.6f \n',t,Press_sem_h(1,26));
end
%FIM
```

Anexo C.3 Ficheiro ‘tese_3.m’

```
%-----tese_3.m-----%
%SÉRGIO CAPELA E SILVA - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO - MODELAÇÃO
%NUMÉRICA DA INTERACÇÃO ONDA-ESTRUTURA EM EMISSÁRIOS
%SUBMARINOS - MARÇO DE 2012-----%
%
%Abre o ficheiro pressoes.txt, calcula Fx, Fy, Cd, Cl e salva os ficheiros fx.txt, fy.txt, cd.txt
%e cl.txt-----%
%
%INÍCIO
tic
disp('Início do cálculo das forças, Cd, Cl');
ro=1.000;
%Reiniciação de contadores
cont1=1;
cont2=1;
passo=1;
i=1;
d=0.1;
%Comprimento unitário
l=1;
%Carrega o ficheiro das pressões
p=load(strcat(path,'\pressoes.txt'));
ni=length(p);
dy=dx;
cd=[];
cl=[];
%Cria e abre os ficheiros cd.txt, cl.txt, fx.txt e fy.txt
fid5=fopen(strcat(path,'\cd.txt'),'a');
fid6=fopen(strcat(path,'\cl.txt'),'a');
fid7=fopen(strcat(path,'\fx.txt'),'a');
fid8=fopen(strcat(path,'\fy.txt'),'a');

if dx==0.005

    aux=length(p)/60;
    %Replicação da matriz até ao comprimento do vector p
```

[illegible]


```
%Escreve o vector das forças no tempo no caso da malha fina
fx=p(:,2)*dx.*aux_dx;
fy=p(:,2)*dy.*aux_dy;
cd=p(:,2).*dx.*aux_dx./((1/2)*ro*u^2*d);
cl=p(:,2).*dy.*aux_dy./((1/2)*ro*u^2*d);
cd=cd';
cl=cl';
i=1;
cd_final=[];
cl_final=[];
fx_final=[];
fy_final=[];
% soma os valores de 148 em 148->cada volta completa ao cilindro
for i=1:148:length(cd)
    fx_final=[fx_final sum(fx(i:i+147))];
    fy_final=[fy_final sum(fy(i:i+147))];

    cd_final=[cd_final sum(cd(i:i+147))];
    cl_final=[cl_final sum(cl(i:i+147))];
end

end

cd_final=smooth(cd_final);
cl_final=smooth(cl_final);
fx_final=smooth(fx_final);
fy_final=smooth(fy_final);

i=1;
fx_grossoiro=[];
fy_grossoiro=[];
cd_grossoiro=[];
cl_grossoiro=[];

for i=1:10:length(fx_final)
    fx_grossoiro=[fx_grossoiro mean(fx_final(i:i+9))];
    fy_grossoiro=[fy_grossoiro mean(fy_final(i:i+9))];

    cd_grossoiro=[cd_grossoiro mean(cd_final(i:i+9))];
    cl_grossoiro=[cl_grossoiro mean(cl_final(i:i+9))];
end
```

```
fx_grossoiro=fx_grossoiro';
fy_grossoiro=fy_grossoiro';
cd_grossoiro=cd_grossoiro';
cl_grossoiro=cl_grossoiro';

i=1;
%Escreve Cd e Cl final nos respectivos ficheiros
for i=1:length(cd_final)
    fprintf(fid5,'%8.6f %8.6f \n',t,cd_final(i));
end
disp('Exportação do ficheiro cd.txt bem sucedida');

i=1;
for i=1:length(cl_final)
    fprintf(fid6,'%8.6f %8.6f \n',t,cl_final(i));
end
disp('Exportação do ficheiro cl.txt bem sucedida');
i=1;
for i=1:length(fx_final)
    fprintf(fid7,'%8.6f %8.6f \n',t,fx_final(i));
end
disp('Exportação do ficheiro fx.txt bem sucedida');
i=1;
for i=1:length(fy_final)
    fprintf(fid8,'%8.6f %8.6f \n',t,fy_final(i));
end
disp('Exportação do ficheiro fy.txt bem sucedida');
fclose('all');
tempomin=num2str(toc/60);
temposeg=num2str(toc/1);
if (toc/60)<1
    disp(['tempo do calculo de' blanks(1) temposeg blanks(1) 'segundos'])
else
    disp(['tempo do calculo de' blanks(1) tempomin blanks(1) 'minutos'])
end

calc_grandezas;
%FIM
```

Anexo C.4 Ficheiro 'calc_grandezas.m'

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-----calc_grandezas.m-----%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----%
%SÉRGIO CAPELA E SILVA - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO - MODELAÇÃO
%NUMÉRICA DA INTERACÇÃO ONDA-ESTRUTURA EM EMISSÁRIOS
%SUBMARINOS - MARÇO DE 2012-----%
%-----%
%CÁLCULO DE Fx, Fy, Fx rms, Fy rms, Cd, Cl, Cd rms, Cl rms, frequência de
%desprendimento, período de desprendimento e St-----%
%-----%
%INÍCIO
close all
clear all
tic
format shortG;

%Definição do diâmetro e da densidade do fluido
d=0.1;
ro=1;
%INSERÇÃO DA CORRIDA E DO RESPECTIVO CAMINHO
existe_corr=exist('corr','var');
if existe_corr==1
    clear corr
end
corr=inputdlg('Corrida','Corrida');
corr=char(corr);
corrida=str2double(strcat(corr(8),corr(9)));

%Procura do directório de corridas dentro da pasta 'MALHA'
if corrida<11 corridas='corridas1_10\';
elseif corrida<21 corridas='corridas11_20\';
elseif corrida<31 corridas='corridas21_30\';
elseif corrida<41 corridas='corridas31_40\';
elseif corrida<51 corridas='corridas41_50\';
end

%Caminho até aos ficheiros; A alteração é fácil, desde que o caminho final
%entre " seja a raiz das pastas das corridas

```

```

path=strcat('D:\faculdade\dissertacao\malha\','corridas',corr);

xc=load([path 'xc']);
yc=load([path 'yc']);
n=length(xc);
m=length(yc);

%Carrega os ficheiros fx.txt, fy.txt, cd.txt, cl.txt e t.txt gerados pelos
%ficheiros tese_1.m, tese_2.m e tese_3.m
fx=load(strcat(path,'fx.txt'));
fy=load(strcat(path,'fy.txt'));
cd=load(strcat(path,'cd.txt'));
cl=load(strcat(path,'cl.txt'));
t=load(strcat(path,'tempo.txt'));

%Interpolação das grandezas no tempo
novo_t=0:0.1:t(length(t));
novo_t=novo_t';
fx_interp=interp1(t,fx,novo_t);
fy_interp=interp1(t,fy,novo_t);
cd_interp=interp1(t,cd,novo_t);
cl_interp=interp1(t,cl,novo_t);

tamanho_t=length(novo_t);

%Definição dos valores de velocidade e tempos inicial e final da série
%temporal pretendida

u_esc=str2double(inputdlg('Velocidade do escoamento','u'));
onda=load(strcat(path,'u_ext.dat'));

if u_esc~=0 && max(onda(59,:))~=0
    if m==126
        u_max_onda=max(onda(59,:));
        u=u_max_onda+u_esc;
    end
    if m==263
        u_max_onda=max(onda(123,:));
        u=u_max_onda+u_esc;
    end
end
end

```

```

if max(onda(59,:))==0
    u=u_esc;
    u_max_onda=0;
end
if u_esc==0

    if m==126
        u_max_onda=max(onda(59,:));
        u=u_max_onda;

    end
    if m==263
        u_max_onda=max(onda(123,:));
        u=u_max_onda;
    end
end

informe=strcat(path,'\informe_generacion.txt') ;
saca_perodo=fopen(informe);
fgetl(saca_perodo);
abre_um=1;
for abre_um=1:20
    AAAA=fgetl(saca_perodo);
    if abre_um==16      BBBB=fgetl(saca_perodo); end
end
perodo_onda=str2num(BBBB(length(BBBB)-3:end));

%Calcula o numero de Keulegan-Karpenter
if u_max_onda==0
    keulegan_karpenter=0;
else
    keulegan_karpenter=perodo_onda*u_max_onda/d;
end
%Calcula o número de Reynolds
reynolds=1*u_esc*0.1/(1*10^-6);

%Definição dos tempos inicial e final de cálculo
tempoini=str2double(inputdlg('Tempo inicial de análise','tempoini'));
tempofim=str2double(inputdlg('Tempo final de análise','tempofim'));

tempoini_i=1;
tempofim_i=1;

```

```

%Extracção dos índices da posição inicial e final da série temporal
i=1;
while tempoini > novo_t(i)
    i=i+1;
    tempoini_i=i;
end

j=1;
while tempofim > novo_t(j)
    j=j+1;
    tempofim_i=j;
end

fx_serie_t=[];
fy_serie_t=[];
cd_serie_t=[];
cl_serie_t=[];

%Séries temporais definidas- Fx, Fy, Cd e Cl
fx_serie_t=fx_interp(tempoini_i:tempofim_i);
fy_serie_t=fy_interp(tempoini_i:tempofim_i);
cd_serie_t=cd_interp(tempoini_i:tempofim_i);
cl_serie_t=cl_interp(tempoini_i:tempofim_i);

%Tamanho do array de séries temporais
serie=length(fx_serie_t);

%Definição dos arrays das séries de tempo grosseiras - 1 valor por segundo
fx_gross_serie_t=[];
fy_gross_serie_t=[];
cd_gross_serie_t=[];
cl_gross_serie_t=[];

%Média dos valores por segundo - no último segundo é efectuada uma média
%dos valores existentes
i=1;
for i=1:10:serie
    if i<serie-9
        fx_gross_serie_t=[fx_gross_serie_t mean(fx_serie_t(i:i+9))];
        fy_gross_serie_t=[fy_gross_serie_t mean(fy_serie_t(i:i+9))];
        cd_gross_serie_t=[cd_gross_serie_t mean(cd_serie_t(i:i+9))];
        cl_gross_serie_t=[cl_gross_serie_t mean(cl_serie_t(i:i+9))];
    end
end

```

```

else
    fx_gross_serie_t=[fx_gross_serie_t mean(fx_serie_t(i:end))];
    fy_gross_serie_t=[fy_gross_serie_t mean(fy_serie_t(i:end))];
    cd_gross_serie_t=[cd_gross_serie_t mean(cd_serie_t(i:end))];
    cl_gross_serie_t=[cl_gross_serie_t mean(cl_serie_t(i:end))];
end
end
if exist(strcat(path,'\serie_fx_gross.txt')==2)
    delete(strcat(path,'\serie_fx_gross.txt'))
end
if exist(strcat(path,'\serie_fy_gross.txt')==2)
    delete(strcat(path,'\serie_fy_gross.txt'))
end
if exist(strcat(path,'\serie_cd_gross.txt')==2)
    delete(strcat(path,'\serie_cd_gross.txt'))
end
if exist(strcat(path,'\serie_cl_gross.txt')==2)
    delete(strcat(path,'\serie_cl_gross.txt'))
end
if exist(strcat(path,'\serie_t_gross.txt')==2)
    delete(strcat(path,'\serie_t_gross.txt'))
end

%Exporta as series temporais de Fx, Fy, Cd e Cl
fidt=fopen(strcat(path,'\serie_t.txt'),'a');
fidfx=fopen(strcat(path,'\serie_fx.txt'),'a');
fidfy=fopen(strcat(path,'\serie_fy.txt'),'a');
fidcd=fopen(strcat(path,'\serie_cd.txt'),'a');
fidcl=fopen(strcat(path,'\serie_cl.txt'),'a');

fx_gross_serie_t=smooth(fx_gross_serie_t);
fy_gross_serie_t=smooth(fy_gross_serie_t);
cd_gross_serie_t=smooth(cd_gross_serie_t);
cl_gross_serie_t=smooth(cl_gross_serie_t);

fidt_gross=fopen(strcat(path,'\serie_t_gross.txt'),'a');
fidfx_gross=fopen(strcat(path,'\serie_fx_gross.txt'),'a');
fidfy_gross=fopen(strcat(path,'\serie_fy_gross.txt'),'a');
fidcd_gross=fopen(strcat(path,'\serie_cd_gross.txt'),'a');
fidcl_gross=fopen(strcat(path,'\serie_cl_gross.txt'),'a');

fprintf(fidt,'%8.6f \n',novo_t(tempoini_i:tempofim_i));
fprintf(fidfx,'%8.6f \n',smooth(fx_serie_t));

```

```

fprintf(fidfy,'%8.6f \n',smooth(fy_serie_t));
fprintf(fidcd,'%8.6f \n',smooth(cd_serie_t));
fprintf(fidcl,'%8.6f \n',smooth(cl_serie_t));

t_gross=0:1:t(length(t));

fprintf(fidt_gross,'%8.6f \n',t_gross(round(tempoini)+1:round(tempofim)+1));
fprintf(fidfx_gross,'%8.6f \n',smooth(fx_gross_serie_t));
fprintf(fidfy_gross,'%8.6f \n',smooth(fy_gross_serie_t));
fprintf(fidcd_gross,'%8.6f \n',smooth(cd_gross_serie_t));
fprintf(fidcl_gross,'%8.6f \n',smooth(cl_gross_serie_t));

%Cálculo do espectro de potências com recurso a FFT - transformada
%rápida de fourier
Y = fft(cl_gross_serie_t);
Y(1)=[];
tamanho_Y=length(Y);
%Espectro de potências
power = abs(Y(1:floor(tamanho_Y/2))).^2;
nyquist = 1/2;
freq = (1:tamanho_Y/2)/(tamanho_Y/2)*nyquist;
period=1./freq;
plot(freq,power);
ylabel('Potências');
xlabel('frequencia (ciclos/tempo)');
hold on;
index=find(power==max(power));
mainfreqStr=num2str(freq(index));
plot(freq(index),power(index),'r','MarkerSize',25);
freqx=freq';
pot_y=power';
%Display da frequência máxima desprendimento, cálculo do período e número
%de Strouhal
text(freq(index),power(index),['frequência = ',mainfreqStr]);
freq_desp=str2double(mainfreqStr);
hold off;
periodo=(1/str2double(mainfreqStr));
st=freq_desp*0.1/u;
ficheiro_result='D:\FACULDADE\DISSERTACAO\MALHA\resultados_das_corridas.txt';
resultados=fopen(ficheiro_result,'a');
%Output do presente ficheiro
disp('-----');
disp(corr);

```

```

fx_rms=rms(fx_serie_t);
fy_rms=rms(fy_serie_t);
cd_rms=rms(cd_serie_t);
cl_rms=rms(cl_serie_t);
disp('Fx');
disp(mean(fx_serie_t)*1000);
disp('Fy');
disp(mean(fy_serie_t)*1000);
disp('Fx rms');
disp(fx_rms);
disp('Fy rms');
disp(fy_rms);
disp('Cd');
disp(mean(cd_serie_t));
disp('Cl');
disp(mean(cl_serie_t));
disp('Cd rms');
disp(cd_rms);
disp('Cl rms');
disp(cl_rms);
disp('Frequência de desprendimento dos vórtices');
disp(mainfreqStr);
disp('Período de desprendimento dos vórtices');
disp(periodo);
disp('Número de strouhal');
disp(st);
fclose('all');

ficheiro_result='D:\FACULDADE\DISSERTACAO\MALHA\RESULTADOS_DAS_CORRIDAS_1_a_10.txt';
outputs=fopen(ficheiro_result,'a');
%OUTPUT PARA O FICHEIRO resultados_das_corridas.txt
fprintf(outputs,'%s \n','-----');
fprintf(outputs,'%s \n',corr);
fprintf(outputs,'%s \n','Velocidade do escoamento devido à corrente');
fprintf(outputs,'%8.4f \n',u_esc);
fprintf(outputs,'%s \n','Velocidade máxima do escoamento devido à onda');
fprintf(outputs,'%8.6f \n',u_max_onda);
fprintf(outputs,'%s \n','Velocidade máxima do escoamento verificada');
fprintf(outputs,'%8.6f \n',u);
fprintf(outputs,'%s \n','Número de Reynolds');
fprintf(outputs,'%6.1f \n',reynolds);
fprintf(outputs,'%s \n','Número de Keulegan-Karpenter');

```

```

fprintf(outputs,'%6.1f \n',keulegan_karpenter);
fprintf(outputs,'%s \n','Início da série temporal (de 0 a 1500)(s)');
fprintf(outputs,'%5.1f \n',tempoini);
fprintf(outputs,'%s \n','Fim da série temporal (de 0 a 1500) (s)');
fprintf(outputs,'%5.1f \n',tempofim);
fprintf(outputs,'%s \n','Fx (N)');
fprintf(outputs,'%8.6f \n',mean(fx_serie_t)*1000);
fprintf(outputs,'%s \n','Fy (N)');
fprintf(outputs,'%8.6f \n',mean(fy_serie_t)*1000);
fprintf(outputs,'%s \n','Fx rms (N)');
fprintf(outputs,'%8.6f \n',fx_rms);
fprintf(outputs,'%s \n','Fy rms (N)');
fprintf(outputs,'%8.6f \n',fy_rms);
fprintf(outputs,'%s \n','Cd');
fprintf(outputs,'%8.6f \n',mean(cd_serie_t));
fprintf(outputs,'%s \n','Cl');
fprintf(outputs,'%8.6f \n',mean(cl_serie_t));
fprintf(outputs,'%s \n','Cd rms');
fprintf(outputs,'%8.6f \n',cd_rms);
fprintf(outputs,'%s \n','Cl rms');
fprintf(outputs,'%8.6f \n',cl_rms);
fprintf(outputs,'%s \n','Frequência de desprendimento dos vórtices (Hz)');
fprintf(outputs,'%s \n',mainfreqStr);
fprintf(outputs,'%s \n','Período de desprendimento dos vórtices (s)');
fprintf(outputs,'%8.6f \n',periodo);
fprintf(outputs,'%s \n','Número de Strouhal');
fprintf(outputs,'%8.6f \n',st);
fclose('all');
tempomin=num2str(toc/60);
temposeg=num2str(toc/1);
if (toc/60)<1
    disp(['tempo do calculo de' blanks(1) temposeg blanks(1) 'segundos'])
else
    disp(['tempo do calculo de' blanks(1) tempomin blanks(1) 'minutos'])
end

%FIM

```

Anexo C.5 Ficheiro 'le_v_e_vort.m'

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%le_v_e_vort.m%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----le_v_e_vort.m-----%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%SÉRGIO CAPELA E SILVA - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO - MODELAÇÃO
%NUMÉRICA DAINTERACÇÃO ONDA-ESTRUTURA EM EMISSÁRIOS
%SUBMARINOS - MARÇO DE 2012-----%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Lê os ficheiros u0**.dat para obter os valores de velocidade horizontal, os ficheiros
%w0**.dat de velocidade vertical, os ficheiros vortex0**.dat e guarda os respectivos
valores %para um intervalo no espaço (em x) e no tempo definidos pelo utilizador-----%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%INÍCIO
close all
clear all
tic
%Definição do caminho da corrida
path=uigetdir('D:\FACULDADE\DISSERTACAO\MALHA\','Caminho da Corrida');

%Definição do intervalo de tempo
tinicial = input('tempo inicial de calculo (p.e.15)=');
tfinal = input('tempo final de calculo (p.e.100)=');
tic;
casoh = 'u';
casov = 'w';
casovort = 'vortex';
wgfiles = dir(strcat(path,casoh));
wgfilesvort = dir(strcat(path,casovort));
numfiles = length(wgfiles)-2;
numfilesvort = length(wgfilesvort)-2;
claveh = casoh;
clavev = casov;
clavevort = casovort;
casoh = strcat(casoh,'\');
casov = strcat(casov,'\');
casovort = strcat(casovort,'\');

%Abre o input e extrai o número de células em x e em y
INPUT=[path 'input' ] ;

```

```

fid=fopen(INPUT);
fgetl(fid);
for i=1:40
    A=fgetl(fid);
    if i==17    B=fgetl(fid);    end
    if i==18    C=fgetl(fid);    end
end
dum=find(B==' '); nivel=str2num(B(dum(1)+1: dum(2)-1));
dum=find(C==' ');
xini=str2num(C(dum(2)+1: dum(3)-1));
xfin=str2num(C(dum(3)+1: dum(4)-1));
xinicial = input('X inicial (p.e. 1)= ');
xfinal = input('X final (p.e. 246)= ');
yini=str2num(C(dum(4)+1: dum(5)-1));
yfin=str2num(C(dum(5)+1: dum(6)-1));
xc=load([path 'xc']);
yc=load([path 'yc']);
obs=load([path 'obs']);
porous=load([path 'porous']);
xc(1:xini-1)=[];
xc(xfin+1-(xini-1):end)=[];
yc(1:yini-1)=[];
yc(yfin+1-(yini-1):end)=[];
n=length(xc);
m=length(yc);

cont = 0;
ttz=0;
%Ciclo para ler as velocidades horizontais
for i=1:numfiles
    file=strcat(path,casoh,claveh,dec2base(i,10,3),'.dat');
    fid=fopen(file,'r');
    continuar = true;
    while continuar
        t=fread(fid,1,'real*8');
        T1=fread(fid,[n,m],'real*4');
        if notfeof(fid)
            if (t>=tinicial && t<=tfinal)
                cont = cont+1;
                uz(:,cont) = T1(:,xinicial:xfinal);
                ttz=[ttz t];
            end
            h.waitbar=waitbar(t/1000);
        end
    end
end

```

```

        else
            continuar = false;
            fclose(fid);
        end
    end
end
delete(h.waitbar);
close all
clearvars -except numfiles numfilesvort path casov clavev casovort clavevort xinicial xfinal
tinicial tfinal uz ttot total n m xc yc obs

cont = 0;
i=1;
ttz=0;
%Ciclo para ler as velocidades verticais
for i=1:numfiles

    file=strcat(path,casov,clavev,dec2base(i,10,3),'.dat');
    fid=fopen(file,'r');
    continuar = true;

    while continuar
        t=fread(fid,1,'real*8');
        T1=fread(fid,[n,m],'real*4');

        if notfeof(fid)
            if (t>=tinicial && t<=tfinal)
                cont = cont+1;
                wz(:,cont) = T1(:,xinicial:xfinal);
                ttz=[ttz t];
            end
            h.waitbar=waitbar(t/1000);
        else
            continuar = false;
            fclose(fid);
        end
    end
end
delete(h.waitbar);

```

```

clearvars -except numfiles numfilesvort path casov clavev casovort clavevort xinicial xfinal
tinicial tfinal uz wz ttot total n m xc yc obs

```

```

cont = 0;
i=1;
ttz=0;
%Ciclo para ler a vorticidade
for i=1:numfilesvort

    file=strcat(path,casovort,clavevort,dec2base(i,10,3),'.dat');
    fid=fopen(file,'r');
    continuar = true;

    while continuar
        t=fread(fid,1,'real*8');
        T1=fread(fid,[n,m],'real*4');

        if notfeof(fid)
            if (t>=tinicial && t<=tfinal)
                cont = cont+1;
                vort(:,cont) = T1(:,xinicial:xfinal);
                ttz=[ttz t];
            end
            h.waitbar=waitbar(t/1000);
        else
            continuar = false;
            fclose(fid);
        end
    end
end
delete(h.waitbar);
close all

%Gravação das variáveis
if(exist('uz.mat'))
    save((strcat(path,'\uz.mat')), 'uz', '-append');
else
    save((strcat(path,'\uz.mat')), 'uz');
end

```

```

if(exist('wz.mat'))
    save((strcat(path,'wz.mat')), 'wz', '-append');
else
    save((strcat(path,'wz.mat')), 'wz');
end
if(exist('vort.mat'))
    save((strcat(path,'vort.mat')), 'vort', '-append');
else
    save((strcat(path,'vort.mat')), 'vort');
end
if(exist('ttz.mat'))
    save((strcat(path,'ttz.mat')), 'ttz', '-append');
else
    save((strcat(path,'ttz.mat')), 'ttz');
end
if(exist('cont.mat'))
    save((strcat(path,'cont.mat')), 'cont', '-append');
else
    save((strcat(path,'cont.mat')), 'cont');
end
save(strcat(path,'xinicial.mat'), 'xinicial');
save(strcat(path,'xfinal.mat'), 'xfinal');
tempomin=num2str(toc/60);
temposeg=num2str(toc/1);
if (toc/60)<1
    disp(['tempo do calculo de' blanks(1) temposeg blanks(1) 'segundos'])
else
    disp(['tempo do calculo de' blanks(1) tempomin blanks(1) 'minutos'])
end

escolha=inputdlg('quiver ou streamslice','Display');
escolha=char(escolha);
if strcmp('quiver',escolha)
    plot_e_quiver;
else
    plot_e_streamslice;
end
%FIM

```


Anexo C.6 Ficheiro 'plot_e_quiver.m'

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-----plot_e_quiver.m-----%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-----%
%SÉRGIO CAPELA E SILVA - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO - MODELAÇÃO
%NUMÉRICA DA INTERACÇÃO ONDA-ESTRUTURA EM EMISSÁRIOS
%SUBMARINOS - MARÇO DE 2012-----%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-----%
%Lê as variáveis uz, wz e ttz criadas pelo ficheiro le_velocidades.m e faz o display das
%mesmas:
%>->Pcolor - módulo da velocidade, sinal sempre positivo
%>->Quiver - vector velocidade - módulo, direcção e sentido
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-----%
%INÍCIO
%Se as variáveis não existirem, carrega-as da respectiva pasta
if exist(path)==0
    path=uigetdir('D:\FACULDADE\DISSERTACAO\MALHA','Caminho da Corrida');
end
if exist('uz')==0
    uz=cell2mat(struct2cell(load(strcat(path,'uz.mat'))));
end
if exist('wz')==0
    wz=cell2mat(struct2cell(load(strcat(path,'wz.mat'))));
end
if exist('ttz')==0
    ttz=cell2mat(struct2cell( load(strcat(path,'ttz.mat'))));
end
if exist('cont')==0
    cont=cell2mat(struct2cell(load(strcat(path,'cont.mat'))));
end
if exist('xinicial')==0
    xinicial=cell2mat(struct2cell(load(strcat(path,'xinicial.mat'))));
end
if exist('xfinal')==0
    xfinal=cell2mat(struct2cell(load(strcat(path,'xfinal.mat'))));
end
if exist('xc')==0
    xc=load([path 'xc']);
end

```

```

if exist('yc')==0
    yc=load([path 'yc']);
end
if exist('obs')==0
    obs=load([path 'obs']);
end
n=length(xc);
m=length(yc);
n=num2str(n);
m=num2str(m);
%Escolha do tipo de quiver
tipoqvr=inputdlg('Tipo de quiver','quiver');
tipoqvr=char(tipoqvr);
%Abre o input para extrair o período de onda
informe=strcat(path,'\informe_generacion.txt') ;
saca_periodo=fopen(informe);
fgetl(saca_periodo);
abre_um=1;
for abre_um=1:20
    AAAA=fgetl(saca_periodo);
    if abre_um==16     BBBB=fgetl(saca_periodo); end
end
periodo_onda=str2num(BBBB(length(BBBB)-3:end));

%Abre o input para extrair ui
ui=1;
INPUT=[path 'input'] ;
fid=fopen(INPUT);
fgetl(fid);
for ui=1:40
    A=fgetl(fid);
    if ui==13     ESCOAM=fgetl(fid); end
end
dum=find(ESCOAM==' ');
uesc=str2num(ESCOAM(dum(2)+2: dum(2)+5));

%Define o intervalo do domínio horizontal que se pretende visualizar
xcz = xc(xinicial:xfinal);
xczgr=[];
ycgr=[];
uzgr=[];
wzgr=[];
%Define os quivers grosseiros: 2 setas por x e y no caso de malha grosseira

```

```
%e 3 no caso de malha fina e ainda define a variável da janela de visualização
%consoante se trate de caso com ou sem onda
if strcmp(n,'246')==1
    %malhas grosseiras
    xczgr=xcz(1:2:length(xcz));
    ycgr=yc(1:2:length(yc));
    uzgr=uz(1:2:end,1:2:end,:);
    wzgr=wz(1:2:end,1:2:end,:);

    if periodo_onda==1
        eixo=([0.45 1.10 0.20 0.50]);
    else
        eixo=([0.35 0.85 0.20 0.50]);
    end
    if periodo_onda~=1 && uesc~=0
        eixo=([0.45 1.10 0.20 0.50]);
    end
end

if strcmp(n,'557')==1
    %Malhas finas
    xczgr=xcz(1:3:length(xcz));
    ycgr=yc(1:3:length(yc));
    uzgr=uz(1:3:end,1:3:end,:);
    wzgr=wz(1:3:end,1:3:end,:);

    if periodo_onda==1
        eixo=([0.50 1.15 0.20 0.50]);
    else
        eixo=([0.40 0.90 0.20 0.50]);
        %eixo=([0.30 1 0.20 0.50]);
    end
end

%Ciclo para fazer o display das imagens
i=1;
tinitial=ttz(2);
tfinal=ttz(end);
tempoarred=round(ttz(2)):0.1:ttz(end);
video = VideoWriter('video.avi','Motion JPEG AVI');
video.FrameRate=10;%Número de frames por segundo - multiplicar 10 pela velocidade de
reprodução pretendida
open(video);
```

```
while i<=length(tempoarred)
    format shortG;
    clf;
    %Maximiza a janela
    set(gcf, 'Position', get(0,'Screensize'));

    %Plot do módulo do vector velocidade
    hold on;
    pcolor(xcz,yc,sqrt(uz(:,:,i).^2+wz(:,:,i).^2));
    shading interp;
    colorbar;
    title(colorbar,'v(m/s)','fontsize',14,'fontname','times new roman');%Título da escala de
    cores
    contour(xc,yc,obs,1,'g','linewidth',1);%Contorno do cilindro
    %Define a escala de cores em função da velocidade
    if uesc==0.002
        caxis([0 0.0035])
    end
    if uesc==0.01
        caxis([0 0.025])
    end
    if uesc==0
        caxis([0 0.035])
    end

    hold on;
    %Plot do módulo de velocidade em valor, direcção e sentido
    scale=0.7;%Escala das setas do quiver

    if strcmp(tipoqvr,'grosseiro')==1
        %Quiver grosseiro
        quiver(xczgr,ycgr,uzgr(:,:,i),wzgr(:,:,i),scale,'k');
    else
        %Quiver normal
        quiver(xcz,yc,uz(:,:,i),wz(:,:,i),scale,'k');
    end

    axis equal;
    set(gca,'fontname','times new roman');
    %eixo=([0.575 0.725 0.275 0.425]);%zoom grosseiro
    axis(eixo);%Define o eixo em função de ser malha grosseira/fina, com ou sem onda
    %Títulos dos eixos
    xlabel('x (m)','fontsize',14,'fontname','times new roman');
```

```
ylabel('y (m)','fontsize',14,'fontname','times new roman');
% Título do gráfico - tempo
title(strcat('t      =      ',num2str(tempoarred(i)), 's'),'fontsize',12,'fontname','Times  new
roman','color','black','FontWeight','bold');
pause(0.0000000000005);
set(gcf,'Renderer','zbuffer');
frame = getframe;
writeVideo(video,frame);
i=i+1;
hold off;
end
close(video);
%FIM
```

Anexo C.7 Ficheiro 'plot_e_streamslice.m'

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-----plot_e_streamslice.m-----%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----%
%SÉRGIO CAPELA E SILVA - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO – MODELAÇÃO
%NUMÉRICA DA INTERACÇÃO ONDA-ESTRUTURA EM EMISSÁRIOS
%SUBMARINOS - MARÇO DE 2012-----%
%-----%
%Lê as variáveis uz, wz e ttz criadas pelo ficheiro le_velocidades.m e faz
%o display das mesmas:
%>->streamslice - linhas de corrente-----%
%-----%
%INÍCIO
%se as variáveis não existirem, carrega-as da respectiva pasta
if exist(path)==0
    path=uigetdir('D:\FACULDADE\DISSERTACAO\MALHA','Caminho da Corrida');
end
if exist('uz')==0
    uz=cell2mat(struct2cell(load(strcat(path,'\uz.mat'))));
end
if exist('wz')==0
    wz=cell2mat(struct2cell(load(strcat(path,'\wz.mat'))));
end
if exist('ttz')==0
    ttz=cell2mat(struct2cell( load(strcat(path,'\ttz.mat'))));
end
if exist('cont')==0
    cont=cell2mat(struct2cell(load(strcat(path,'\cont.mat'))));
end
if exist('xinicial')==0
    xinicial=cell2mat(struct2cell(load(strcat(path,'\xinicial.mat'))));
end
if exist('xfinal')==0
    xfinal=cell2mat(struct2cell(load(strcat(path,'\xfinal.mat'))));
end
if exist('xc')==0
    xc=load([path '\xc']);
end
if exist('yc')==0

```

```

    yc=load([path '\yc']);
end
if exist('obs')==0
    obs=load([path '\obs']);
end
n=length(xc);
m=length(yc);
n=num2str(n);
m=num2str(m);
informe=strcat(path,'\informe_generacion.txt') ;
saca_periodo=fopen(informe);
fgetl(saca_periodo);
abre_um=1;
for abre_um=1:20
    AAAA=fgetl(saca_periodo);
    if abre_um==16    BBBB=fgetl(saca_periodo); end
end
periodo_onda=str2num(BBBB(length(BBBB)-3:end));

%Abre o input para extrair ui
ui=1;
INPUT=[path '\input' ] ;
fid=fopen(INPUT);
fgetl(fid);
for ui=1:40
    A=fgetl(fid);
    if ui==13    ESCOAM=fgetl(fid); end
end
dum=find(ESCOAM==' ');
uesc=str2num(ESCOAM(dum(2)+2: dum(2)+5));

%Define o intervalo do domínio horizontal que se pretende visualizar
xcz = xc(xinicial:xfinal);
xczgr=[];
ycgr=[];
uzgr=[];
wzgr=[];
%Define a variável da janela de visualização consoante se trate de caso com ou sem onda
if strcmp(n,'246')==1
    %malhas grosseiras

    if periodo_onda==1

```

```

        eixo=([0.35 0.95 0.2 0.5]);
    else
        eixo=([0.30 0.90 0.2 0.5]);
    end
    if periodo_onda~=1 && uesc~=0
        eixo=([0.30 0.95 0.2 0.5]);
    end
end

if strcmp(n,'557')==1
    %malhas finas

    if periodo_onda==1
        eixo=([0.40 1 0.2 0.50]);
    else
        eixo=([0.35 0.95 0.15 0.55]);
    end
end

%ciclo para fazer o display das imagens
i=1;
tempoarred=round(ttz(2)):0.1:ttz(end);
while i<=length(tempoarred)
    set(gcf, 'Position', get(0,'Screensize'));
    format shortG;
    clf;
    hold on;
    shading interp;
    contour(xc,yc,obs,1,'k','linewidth',1);%Contorno do cilindro
    %Define a escala de cores em função da velocidade
    if uesc==0.002
        caxis([0 0.0035])
    end
    if uesc==0.01
        caxis([0 0.025])
    end
    if uesc==0
        caxis([0 0.035])
    end
    densidade=2;
    str=streamslice(xcz,yc,uz(:,i),wz(:,i),densidade,'method','nearest');
    set(str,'Color','k')

```

```

axis equal;
set(gca,'fontname','times new roman');
axis(eixo);%Define o eixo em função de ser malha grosseira/fina, com ou sem onda
% Títulos dos eixos
xlabel('x (m)','fontsize',14,'fontname','times new roman');
ylabel('y (m)','fontsize',14,'fontname','times new roman');
% Título do gráfico - tempo
title(strcat('t = ',num2str(tempoarred(i)), 's'),'fontsize',12,'fontname','Times new
roman','color','black','FontWeight','bold');
pause(0.0000000000005);

    i=i+1;
    hold off;
end
%FIM

```

Anexo C.8 Ficheiro 'plot_e_vortex.m'

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-----plot_e_vortex.m-----%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%SÉRGIO CAPELA E SILVA - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO - MODELAÇÃO
%NUMÉRICA DA INTERACÇÃO ONDA-ESTRUTURA EM EMISSÁRIOS
%SUBMARINOS - MARÇO DE 2012
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Lê as variáveis vortex e ttz criadas pelo ficheiro le_velocidades_com_vortex.m e faz
%o display das mesmas:
%>Pcolor - valor da vorticidade-----%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%INÍCIO
%se as variáveis não existirem, carrega-as da respectiva pasta
if exist(path)==0
    path=uigetdir('D:\FACULDADE\DISSERTACAO\MALHA','Caminho da Corrida');
end
if exist('vort')==0
    vort=cell2mat(struct2cell(load(strcat(path,'\vort.mat'))));
end
if exist('ttz')==0
    ttz=cell2mat(struct2cell( load(strcat(path,'\ttz.mat'))));
end
if exist('cont')==0
    cont=cell2mat(struct2cell(load(strcat(path,'\cont.mat'))));
end
if exist('xinicial')==0
    xinicial=cell2mat(struct2cell(load(strcat(path,'\xinicial.mat'))));
end
if exist('xfinal')==0
    xfinal=cell2mat(struct2cell(load(strcat(path,'\xfinal.mat'))));
end
if exist('xc')==0
    xc=load([path '\xc']);
end
if exist('yc')==0
    yc=load([path '\yc']);
end
if exist('obs')==0

```

```

    obs=load([path '\obs']);
end
n=length(xc);
m=length(yc);
n=num2str(n);
m=num2str(m);
informe=strcat(path,'\informe_generacion.txt') ;
saca_perodo=fopen(informe);
fgetl(saca_perodo);
abre_um=1;
for abre_um=1:20
    AAAA=fgetl(saca_perodo);
    if abre_um==16    BBBB=fgetl(saca_perodo); end
end
periodo_onda=str2num(BBBB(length(BBBB)-3:end));

%Abre o input para extrair ui
ui=1;
INPUT=[path '\input'] ;
fid=fopen(INPUT);
fgetl(fid);
for ui=1:40
    A=fgetl(fid);
    if ui==13    ESCOAM=fgetl(fid); end
end
dum=find(ESCOAM==' ');
uesc=str2num(ESCOAM(dum(2)+2: dum(2)+5));

%Define o intervalo do domínio horizontal que se pretende visualizar
xcz = xc(xinicial:xfinal);

%define os eixos em função das condições de simulação
if strcmp(n,'246')==1
    %malhas grosseiras

    if periodo_onda==1
        eixo=([0.35 0.95 0.2 0.5]);
    else
        eixo=([0.30 0.90 0.2 0.5]);
    end
    if periodo_onda~=1 && uesc~=0
        eixo=([0.30 0.95 0.2 0.5]);
    end
end

```

```

end
end

if strcmp(n,'557')==1
    %malhas finas

    if periodo_onda==1
        eixo=([0.40 1 0.2 0.50]);
    else
        eixo=([0.35 0.95 0.15 0.55]);
    end
end

%ciclo para fazer o display das imagens
i=1;
tempoarred=round(ttz(2)):0.1:ttz(end);

while i<=length(tempoarred)

    format shortG;
    clf;
    %Maximiza a janela
    set(gcf, 'Position', get(0,'Screensize'));
    colormap jet;
    %Plot da vorticidade
    hold on;
    pcolor(xcz,yc,vort(:,i));
    %pcolor(xcz,yc,sqrt(uz(:,i).^2+wz(:,i).^2));
    shading interp;
    colorbar;
    title(colorbar,'vortex(1/s)','fontangle','italic','fontsize',14,'fontname','times new
roman');%Título da escala de cores
    contour(xc,yc,obs,1,'g','linewidth',1);%Contorno do cilindro

    %define o máximo e mínimo da vorticidade: para compensar a elevada
    %vorticidade na camada de corte optou-se por reduzir o máximo para 6% do
    %seu valor de modo a uma melhor visualização no resto do domínio
    minv=min(min(min(vort)))/8;
    maxv=max(max(max(vort)))/8;
    caxis([minv maxv])
    %caxis([-0.1 0.1])
    hold on;

```

```

axis equal;
set(gca,'fontname','times new roman');
%eixo=([0.575 0.725 0.275 0.425]);%zoom grosseiro
%eixo=([0.2 1.6 0.15 0.55]);%domínio grande
axis(eixo);%Define o eixo em função de ser malha grosseira/fina, com ou sem onda
%Títulos dos eixos
xlabel('x (m)','fontsize',14,'fontname','times new roman');
ylabel('y (m)','fontsize',14,'fontname','times new roman');
%Título do gráfico - tempo
title(strcat('t = ',num2str(tempoarred(i)), 's'),'fontsize',12,'fontname','Times new
roman','color','black','FontWeight','bold');
pause(0.000000000005);
i=i+1;
hold off;
end
%FIM

```